

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE DIFERENTES
FIBRAS ESTRUCTURALES DOSIFICADAS COMO REFUERZO EN
TÉRMINOS DE SU ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA EN
CONCRETOS FIBROREFORZADOS.**

POR

FERNANDO LEONEL ZUÑIGA GAMEZ

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

JUNIO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO DE DIFERENTES
FIBRAS ESTRUCTURALES DOSIFICADAS COMO REFUERZO EN
TÉRMINOS DE SU ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA EN
CONCRETOS FIBROREFORZADOS.

Por

FERNANDO LEONEL ZUÑIGA GAMEZ

Como requisito para obtener el grado de maestría en ciencias con
orientación en materiales de la construcción

Junio 2026

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN.....	8
1.2.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.3.-JUSTIFICACIÓN	15
CAPÍTULO 2.-HIPOTESIS Y OBJETIVOS	17
2.1.-HIPÓTESIS	17
2.2.-OBJETIVO GENERAL.....	17
2.3.-OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
CAPÍTULO 3.-REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
CAPÍTULO 4.- MARCO TEÓRICO.....	26
4.1 Concreto.....	27
4.2.- Concreto reforzado con fibras.....	28
4.3 Fibras.....	29
4.3.1.- Tipos de fibra.....	30
4.4.- Tenacidad.....	32
CAPÍTULO 5.- METODOLOGÍA.....	35
5.1 Caracterización de las fibras.....	39
5.2 diseño de mezcla.....	42
5.3.- Proceso de mezclado	44
6.- DISCUSION DE RESULTADOS.....	50
6.1 ABSORCIÓN DE ENERGIA Y TENACIDAD EN LA NORMA EN 14651	53
6.1.1 Fibra de Acero AC1-1.0%	54
6.1.2 Fibra de Acero AC1-1.5%	56
6.1.3 Fibra de Acero AC1-2.0%	58
6.1.4 Fibra de Acero AC2-1.0.....	60
6.1.5 Fibra de Acero AC2-1.5%	62
6.1.6 Fibra de Acero AC2-2.0%	64

.....	64
6.1.7 Fibra de Alcohol polivinílico EN-1.0.....	66
6.1.8 Fibra de Alcohol polivinílico EN-1.5%	68
6.1.9 Fibra de Alcohol polivinílico EN-2.0%	70
6.1.10 Fibra de Polipropileno BC-1.0%	72
6.1.11 Fibra de Alcohol Polivinílico K-1.0%	74
6.1.12 Fibra de Alcohol Polivinílico K-1.5%	76
6.1.13 Fibra de Alcohol polivinílico K-2.0%.....	78
6.1.14 Fibra de Polipropileno PP-1.0%.....	80
6.1.15 Fibra de Polipropileno PP-1.5%.....	82
.....	82
6.1.16 Fibra de Polipropileno PP-2.0%.....	84
6.2 ANALISIS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXION POR TIPOS DE FIBRA	86
6.3 ABOSRCIÓN DE ENERGIA VS SUPERFICIE ESPECIFICA.....	92
7.- CONCLUSIONES.....	94
8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: De izquierda a derecha, grafica de mezcla CPC 30 y fibra de 38mm. Mezcla de CPC 30 y fibra de 48mm. Zongcai, 2016.	20
Figura 2: Modelo de definición para un TPL, Morgan 1195.	21
Figura 3: Definición del TPL para un concreto lanzado reforzado con fibras sintéticas. Morgan, 1995.	22
Figura 4: Geometría de una fibra.	24
Figura 5: Dimensiones de una fibra para su cálculo de superficie específica.	25
Figura 6: Concreto en estado fresco con fibras metálicas.	26
Figura 7: Concreto en estado fresco.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8: Viga de concreto reforzada con fibras.	29
Figura 9: Microfibra de polipropileno.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10: Ensayo de una viga mediante la norma EN 14651.	33
Figura 11: Dimensiones del espécimen de acuerdo a la norma EN 14651.	38
Figura 12: Imagen SEM para la fibra Ac1.	39
Figura 13: Imagen SEM para la fibra Ac2.	40
Figura 14: Imagen SEM para la fibra Bc.	40
Figura 15: Imagen SEM para la fibra En.	41
Figura 16: Imagen SEM para la fibra K.	41
Figura 17: Imagen SEM para la fibra PP.	42
Figura 18: Mezcladora humedecida.	45
Figura 19: Homogenización de los agregados.	45
Figura 20: Adición de cemento, polvo de caliza y aditivos.	46
Figura 21: Adición de las fibras.	47
Figura 22: Mezcla en carretilla.	48
Figura 23: Llenado de la viga sobre la mesa de vibrado.	48
Figura 24: Vigas cubiertas para evitar la pérdida de humedad.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 25: Resistencia a la compresión en cilindros de concreto.	51
Figura 26: Resistencia a la flexión residual y tenacidad acumulada AC1 1.0%	54
Figura 27: Resistencia a la flexión residual y tenacidad acumulada AC1 1.5%	56
Figura 28: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC1-2.0%	58
Figura 29: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC2-1.0%	60
Figura 30: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad acumulada AC2-1.5%	62
Figura 31: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC2-2.0%	64
Figura 32: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada EN-1.0%	66
Figura 33: RFR y Tenacidad Acumulada EN-1.5%	68
Figura 34: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada EN-2.0%	70
Figura 35: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada BC-1.0%	72
Figura 36: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada K-1.0%	74
Figura 37: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad acumulada K-1.5%	76
Figura 38: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada K-2.0%	78

Figura 39: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada PP-1.0%.....	80
Figura 40: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada PP-1.5%.....	82
Figura 41: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada PP-2.0%.....	84
Figura 42: Resistencia a la flexión en concreto reforzado con fibras de acero.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 43: Resistencia a la flexión en concreto con fibras de polipropileno.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 44: Resistencia a la flexión en concreto con fibras de polivinilo de alcohol.	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 45: Herramienta gráfica para selección de fibras.	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Revisión del estado del arte respecto al método de dosificación de fibras.	11
Tabla 2: Proporcionamiento para una mezcla de concreto lanzado con 1.0% de fibras de acero.....	13
Tabla 3: Proporcionamiento para una mezcla de concreto con 1.0% de fibras sintéticas.	14
Tabla 4:Requerimientos de desempeño para un concreto lanzado típico. Adaptada del manual del ACI 506.5 Guía de especificación para concreto lanzado subterráneo.....	18
Tabla 5: Diámetro se fibras en el trabajo de Rostami	19
Tabla 6: Niveles de desempeño de tenacidad	22
Tabla 7: Características principales para un concreto lanzado típico.	23
Tabla 8: Características de los materiales.	36
Tabla 9: Proporcionamiento de mezclas de concreto por superficie específica y volumen	43
Tabla 10: Resultados de la caracterización de los materiales.....	50
Tabla 11: Desarrollo de resistencia a la compresión.....	51
Tabla 12: Índices de tenacidad AC-1.0%	55
Tabla 13: Índices de tenacidad AC1-1.5%.....	56
Tabla 14: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC1-2.0%.....	58
Tabla 15: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-1.0%.....	60
Tabla 16: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-1.5%.....	62
Tabla 17: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-2.0%.....	64
Tabla 18: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-1.0%.....	66
Tabla 19: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-1.5%.....	68
Tabla 20: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-2.0%.....	70
Tabla 21: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL BC-1.0%.....	72
Tabla 22: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.0%.....	75
Tabla 23: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.5%.....	77
Tabla 24: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.5%.....	79
Tabla 25: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-1.0%.....	80
Tabla 26: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-1.5%.....	82
Tabla 27: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-2.0%.....	84

CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado con fibras (FRC) ha emergido como una innovación revolucionaria en la industria de la construcción, transformando la manera de cómo se diseñan y construyen las estructuras. Esta tecnología combina los materiales tradicionales del concreto con fibras de refuerzo, ofreciendo una serie de ventajas sobre el concreto convencional en términos de resistencia, durabilidad y rendimiento estructural. La inclusión de fibras en el concreto no solo mejora su resistencia a la tensión y flexión, sino que también proporciona una mayor resistencia al agrietamiento por contracción y mejora la tenacidad del concreto, lo que resulta en estructuras más duraderas y seguras.

El desarrollo de nuevas tecnologías en los materiales y la experiencia de trabajo de campo han permitido ampliar el conocimiento para la aplicación del concreto reforzado con fibras[1]. De acuerdo con el American Concrete Institute “Report on the physical properties and durability of fiber reinforced concrete” las fibras se han utilizado como refuerzo de materiales frágiles. Desde 1967, diferentes tipos de fibras han mejorado con éxito las propiedades físicas y la durabilidad del concreto.

Los requerimientos de las nuevas estructuras han dado paso al desarrollo de diferentes tipos de fibras que satisfagan las necesidades presentes en la industria de la construcción. Así mismo las fibras han recibido ciertas clasificaciones para permitir una distinción entre estas mismas, diferenciándose por su material existen las fibras metálicas y las sintéticas; siendo las primeras prácticamente en su totalidad de acero, las fibras de este tipo se utilizan como un refuerzo estructural en concretos que requieren tener altos desempeños estructuralmente hablando, como los son los pisos industriales, pistas de aeropuertos y en la industria minera; mientras que en las sintéticas existen distintos materiales siendo el más utilizado el polipropileno. Estas fibras en principio se utilizaban para reducir los agrietamientos por contracción en el concreto[2], sin embargo, se han estado desarrollando fibras que puedan satisfacer necesidades estructurales.

Así mismo existe una clasificación con relación al tamaño del diámetro del filamento y que a su vez es una característica importante para determinar el uso que se le puede

dar a la fibra. Cuando el filamento tiene un diámetro que va de 0.05mm a 2.0mm reciben el nombre de macrofibras, además que éstas son idealmente utilizadas como refuerzo estructural ya que por su tamaño permiten distribuir mejor las cargas dentro de la matriz de concreto[3] . Cuando las fibras tienen un diámetro que va de 0.023mm a 0.05mm reciben el nombre de microfibras, las cuales tienen la función de disminuir los agrietamientos por contracción dentro del concreto.

No obstante, la manera en que las fibras se dosifican para una mezcla de concreto se mantenido a lo largo del uso de estas en la industria de la construcción, esta dosificación por volúmenes ignora propiedades importantes de las fibras como lo son el diámetro y su longitud. Las fibras se dosifican en relación con el volumen total de la mezcla siendo por los porcentajes más comunes para las fibras estructurales de un 0.5%; donde la función de este volumen va en relación de disminuir los agrietamientos que pueda sufrir la matriz por contracción, hasta un 3.0%; donde esta cantidad de fibra si tiene una función estructural tratando de mejorar la resistencia los esfuerzos de tensión y la capacidad de absorción de energía del material[4].

Por lo que se ha desarrollado un método donde las propiedades geométricas del filamento son relevantes y permite cuantificar la superficie de contacto disponible para adherirse a la matriz de concreto. Se ha demostrado que la longitud permite mejorar la resistencia a la flexión del concreto [3], debido a que esta característica geométrica habilita a que haya una mejor distribución de los esfuerzos de tensión internos dentro de la matriz.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo implementar un método de dosificación diferente que permita tomar en cuenta las propiedades antes mencionadas de las fibras, de manera que se logré hacer una selección más asertiva en cuanto a la cantidad de filamentos que se deben de agregar a la mezcla de concreto para satisfacer los requerimientos estructurales del proyecto. Este método de dosificación distinto al tradicional tiene por nombre de dosificación por superficie específica.

La superficie específica es una medida aplicada a todos los sólidos con granos o partículas y es una propiedad importante debido a que muchos procesos físicos y químicos tienen lugar en la superficie de los sólidos. Por lo que la definición de la superficie específica aplicada a las fibras se considera como el área disponible que tiene un filamento para estar en contacto con la matriz de concreto[5].

Conocer esta medida al agregarla a una mezcla de concreto, permite cuantificar de una manera puntual el desempeño que está teniendo la fibra dentro de la matriz en relación con el área de contacto que esta tiene disponible. Esta superficie específica se calcula en base a las propiedades geométricas de la fibra (diámetro y longitud). Una vez que se adicione la fibra, se podrá calcular cual fue la superficie específica que se añadió, por lo que al querer cuantificar como la fibra mejoro el desempeño del material tanto en flexión o en su capacidad de absorber energía[6], se pudiera generar diferentes tipos de herramientas que faciliten la selección de una fibra y la cantidad que se dosificará en una mezcla de concreto para alcanzar una resistencia a la flexión o una capacidad de absorción de energía solicitada por un proyecto.

Cuando se habla acerca de la capacidad de absorción de energía en el concreto, se refiere a la capacidad de resistir y disipar la energía durante la carga, lo que eleva el punto en el que este alcanza su falla y el agrietamiento cuando se encuentra bajo cargas dinámicas y de impacto.

Hay varios mecanismos por los cuales las fibras contribuyen a la absorción de energía en el concreto[7]; Cuando se necesita un refuerzo de tenacidad, las fibras actúan como un refuerzo disperso aleatoriamente dentro de toda la matriz, por lo cual distribuye de manera tridimensional los esfuerzos en todo el material. Lo que aumenta su absorción de energía antes de llegar a la falla. Cuando se necesita mejorar el control del agrietamiento: Las fibras permiten controlar la propagación de las fisuras, de manera que el escenario en el que se produzca una falla repentina es más complicado y a su vez esto permite que el material pueda deformarse en mayor medida antes de llegar a la ruptura. De la misma forma la mejora la resistencia al impacto, ya que la dispersión de las fibras dentro de la matriz permite una mejor distribución de las tensiones internas, lo que mejora su resistencia al impacto. Y finalmente el incremento de la resistencia a la fatiga: Debido a que las fibras son las encargadas de soportar los esfuerzos de tensión dentro de la matriz de concreto, estas pueden soportar cargas repetidas sin que el material en su totalidad tenga un deterioro en su capacidad de absorber energía.

Como se observa en los mecanismos que tienen las fibras dentro de la matriz la capacidad de absorción de energía es una propiedad importante que se mejorada debido a adición de este refuerzo al concreto, por lo que es necesario cuantificar de manera confiable. Uno de los ensayos para poder cuantificar la absorción de energía en un material fibroreforzado es mediante la norma "EN 14651 viga ranurada". Este ensayo

permite determinar la capacidad de absorción de energía que existe en el material, esto gracias a que esta propiedad se define como el área bajo la curva en un diagrama de esfuerzo deformación.

Por lo que el fin de este trabajo de investigación, es desarrollar una herramienta que permite correlacionar la superficie específica de una fibra determinada que se adicione a un volumen de concreto y como esta medida mejora la capacidad de absorción de energía del material. Con el uso de esta herramienta podría permitirse realizar una mejor selección de una fibra en base a sus características geométricas y seleccionar la cantidad necesaria de fibra dentro de la matriz para poder alcanzar una tenacidad requerida por el proyecto.

1.2.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el método de diseño por volúmenes utilizado para dosificar una mezcla de concreto es mediante el diseño por volúmenes[8], es decir que mediante las densidades de los materiales con los cuales se quiera trabajar la mezcla, una relación agua-cemento (a/c), el tipo de agregados y la fibra de refuerzo, donde esta se dosifica comúnmente del 1% al 2% del contenido total de la mezcla.

Realizando una investigación en el estado del arte, se ha encontrado que el método para dosificar fibras de refuerzo a una mezcla de concreto ha sido la dosificación por volúmenes, en la tabla 1, se presentan algunos artículos que usan esta dosificación a lo largo de los años.

Tabla 1: Revisión del estado del arte respecto al método de dosificación de fibras.

Autor	Año	Título	Método de dosificación	Volumen
E. S. Bernard.	2001	Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens.	Por volúmenes	1.50%

Ciancio.D.	2014	Evaluation of fibre-reinforced concrete fracture energy through tests on notched round determinate panels with different diameters.	Por volúmenes	1.00%
Deng, Z.	2015	Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test.	Por volúmenes	0.50%
Estrada-Cáceres, A.	2021	Alternative small-scale tests to characterize the structural behaviour of steel fibre-reinforced sprayed concrete.	Por volúmenes	1.00%
Hwee-Tan, K.	2021	Correlations among notched beam tests, double punch tests and round panel tests for a high-performance fibre concrete cast at site.	Por volúmenes	2.00%

En este tipo de diseño, de la fibra solo se considera su densidad y su volumen, por lo que no toma en cuenta características importantes de esta como lo es el diámetro (θ), la longitud (l), su radio aspecto y su área superficial.

El uso de macro fibras sintéticas se está implementando en este tipo de concreto para mejorar su absorción de energía [3]. Este concreto puede implementarse como recubrimiento de estratos para la construcción de túneles, recubrimiento de muros en la minería y en la estabilización de taludes.

El proceso constructivo de las obras antes mencionadas requiere del uso de acero de refuerzo como lo es la malla electrosoldada o un armado de varillas, para después sobre este lanzar el concreto. Sin embargo, la colocación de este refuerzo sobre los muros del túnel o del talud, supone un tiempo de trabajo muy grande debido a que la geometría de estos es muy irregular, además de ser muy accidentada. La incorporación de fibras de acero ha permitido, en ciertas aplicaciones, reducir la cantidad de acero de refuerzo debido a que le proporcionan al material de una mayor ductilidad[9].

Al dosificar por volúmenes, cuando se requieren especificaciones como concretos de altos desempeños, el contenido de fibra aumenta de manera considerable, lo que trae como consecuencia una reducción de la trabajabilidad de la mezcla.

Por lo que con el tiempo se ha pensado en nuevas soluciones y alternativas, una de ellas es la de agregar fibras sintéticas al concreto, ya que en un principio pese que a las fibras de acero mejoran las propiedades mecánicas del concreto lanzado tales como; la capacidad de absorción de energía, la resistencia al impacto y un aumento en el esfuerzo máximo del material. Al ser de acero tienen una alta densidad, en cambio las fibras sintéticas son considerablemente más ligeras.

Así mismo se puede hacer una comparación de costos, la fibra de acero es menos costosa en cualquiera de sus presentaciones comparado con la fibra sintética. Esto ocasiona que muchas veces se prefiera utilizar la fibra de acero, sin embargo, en un diseño de mezcla de concreto, se tiene que agregar una cantidad en peso de fibra de acero, lo cual termina elevando de todas formas el precio. En el caso de las fibras sintéticas es muy poco lo que se tiene que agregar. Por lo tanto, el continuo uso de las fibras de acero en cualquier diseño de mezclas ha generado que no se tengan en cuenta los beneficios de las fibras sintéticas. Además, que estas permiten obtener valores de tenacidad similares, de la misma forma que mejora el comportamiento post-agrietamiento del material.

Suponiendo que se tiene la siguiente dosificación para la producción de un metro cúbico de concreto, se realiza la siguiente comparación:

Tabla 2: Proporcionamiento para una mezcla de concreto lanzado con 1.0% de fibras de acero.

Material	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Volumen (m ³)
Cemento	350	3100	0.1129
Agua	168	1000	0.17
AF	1102.764	2600	0.424

AG	701.883	2700	0.26
Aire	2.50%	N/A	0.025
Fibras	78	7800	0.01
Sumatoria			1

Se observa que para realizar un metro cubico de mezcla, se requieren 78.0kg de fibra de acero.

Tabla 3: Proporcionamiento para una mezcla de concreto con 1.0% de fibras sintéticas.

Material	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m³)	Volumen (m³)
Cemento	350	3100	0.1129
Agua	160	1000	0.16
AF	1115.66	2600	0.429
AG	710.091	2700	0.263
Aire	2.50%	N/A	0.025
Fibras	9.1	910	0.01
Sumatoria			1

En cambio, para el caso de una fibra de polipropileno, el consumo total de fibras es de 9.1kg. De esta manera se comprueba que, en la práctica, el consumo de fibras de acero es mucho mayor lo que eleva mucho el costo de realizar una mezcla. Además, la experiencia en campo demuestra que mientras se trabaje en el rango de un concreto con un revenimiento de 16.0 cm, no se presenta la perdida de trabajabilidad por la adición de fibra sintética.

Respecto al mercado de la construcción (precios en moneda nacional), el costo de la fibra de acero “X” es de alrededor de \$75.00MXN por kilogramo. El costo

de la fibra sintética “Y” es de \$350.00MXN. Por lo que haciendo el cálculo del costo total de adicionar cada una de las fibras a las mezclas anteriores es:

Fibra de acero “X”

Costo total= (\$75.00/kg) (78.00kg) = \$5850.00MXN

Fibra sintética “Y”

Costo total= (\$350.00/kg) (9.10kg) = \$3185.00MXN

Se puede observar que existe una diferencia económica entre los distintos tipos de materiales para fibras de uso estructural. Entonces se presenta la incógnita de porque aun siendo un material más costoso se prefiere usar las fibras de acero.

Finalmente, agregar las fibras de forma tradicional (por volúmenes) ignora una parte muy importante de las fibras, es decir, su geometría. Las fibras presentan propiedades geométricas como los son su diámetro, longitud y relación aspecto, estas propiedades son las que rigen la manera y el comportamiento que va a presentar el concreto fibroreforzado una vez que este empieza a trabajar. Las fibras al estar embebidas en la matriz de concreto, el área que tienen disponible para estar en contacto con el concreto es a lo que se le llama superficie específica, por lo tanto, este trabajo permitirá evaluar el comportamiento al adicionar las fibras en términos de la superficie específica que éstas tienen disponible para adherirse a la matriz.

1.3.-JUSTIFICACIÓN

Lo que se busca realizar con este nuevo método de superficie específica, es que al tomar en cuenta las variables como la geometría y el módulo de elasticidad de las fibras, se pueda optimizar la adición de estas dentro de una mezcla de concreto. Además, se tomarán en cuenta diferentes fibras sintéticas del mercado, ya que estas tienen diferentes diámetros.

Se ha demostrado que, al reducir el diámetro de las fibras, la superficie específica de contacto entre las fibras y la matriz cementante aumenta. Este trabajo evaluará si el comportamiento de las fibras, tanto de material sintético como de material metálico (acero) al dosificarse mediante su superficie específica disponible para adherirse a la matriz, permite alcanzar los mismos valores de tenacidad que al adicionarse por volúmenes.

Aumentar la capacidad de absorción de energía de un concreto lanzado, mediante el uso de fibras sintéticas, permitirá aumentar su uso en las diferentes construcciones como lo son los túneles, el recubrimiento de muros en la minería y la estabilización de taludes, reduciendo los costos ya que se podría reducir el acero de refuerzo, así como reducir los tiempos de trabajo al evitar tener que preparar el armado antes mencionado dependiendo de la geometría de la obra.

CAPÍTULO 2.-HIPOTESIS Y OBJETIVOS

2.1.-HIPÓTESIS

- La adición de fibras de acero y sintéticas en el concreto, dosificada en términos de la superficie específica del filamento permitirá desarrollar valores de tenacidad en el concreto fibroreforzado similares a los obtenidos en una dosificación por volumen.

2.2.-OBJETIVO GENERAL

- Determinar el comportamiento mecánico en términos de tenacidad de concretos fibroreforzados fabricados con diferentes fibras estructurales de acero y sintéticas dosificadas mediante su superficie específica.

2.3.-OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de distintas fibras estructurales (acero y sintéticas) en la resistencia a la compresión de concreto fibroreforzados.
- Definir la fibra con mejor comportamiento en términos de resistencia a la flexión residual a través de la prueba de la viga ranurada EN14651.

- Desarrollar una herramienta grafica para la selección de fibra estructurales de acuerdo a un desempeño en términos de tenacidad solicitado.

CAPÍTULO 3.-REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, en la tabla 4 se presentan las propiedades requeridas para un concreto lanzado convencional de acuerdo con el manual ACI 506.5-22 “Specifying Underground Shotcrete – Guide”.

Tabla 4:Requerimientos de desempeño para un concreto lanzado típico. Adaptada del manual del ACI 506.5 Guía de especificación para concreto lanzado subterráneo.

Propiedades del concreto lanzado	Método de prueba	Edad (d)	Límites en mezcla húmeda
A/C máximo			0.40 a 0.45
Contenido de aire en el lanzado (%)	ASTM C 231	-	4 ±1
Contenido de aire antes del lanzado (%)	ASTM C 231	-	7 a 10
Revenimiento de la mezcla (mm)	ASTM C 143/C143M	-	80 ±30
Factor de espaciamiento máximo en lanzado (µm)	ASTM C 457	-	0.012 (300)
Máxima absorción de agua (%)	ASTM C 642	7	8
Máximo volumen de vacíos (%)	ASTM C 642	7	7
Resistencia mínima a la compresión (MPa)	ASTM C 1604	8 hrs	5.5
		1	8
		3	15
		7	30

		28	40
Resistencia mínima a la flexión (MPa)	ASTM C 1609 o ASTM C 78	7	4.0 a 4.5
Mínima absorción de energía (Joules)	ASTM C 1550	7	280
Nivel mínimo de desempeño de tenacidad	Morgan et al (1995)	7	III

En la revisión bibliográfica se ha observado que el diseño por superficie específica ha empezado a trabajarse de manera experimental[6] , se realizó un trabajo donde se incorporaron fibras de diferentes diámetros en una misma mezcla de concreto convencional, manteniendo una misma longitud de estas. Añadió las fibras en una proporción del 0.55% del contenido de la mezcla (1m^3), todas de polipropileno. En la tabla 6 se muestran las propiedades geométricas de las fibras.

Tabla 5: Diámetro se fibras en el trabajo de Rostami

Fibra	1	2	3	4	5	6
Diámetro (cm)	1.00	0.70	0.50	0.30	0.20	0.10

De acuerdo con los resultados que se presentaron, se determinó que mientras más se disminuya el diámetro de la fibra, existe más área superficial de contacto entre la matriz de concreto y la fibra, lo que a su vez aumenta de manera considerable la absorción de energía por fractura de la mezcla.

En esta investigación se encontró que la fibra con el diámetro más pequeño obtuvo una absorción de energía 14 veces más grande que la muestra de referencia que no incluye fibras.

mediante la prueba del panel circular[3] determinó que las fibras pueden mejorar el desempeño post agrietamiento, definiendo que la longitud de las es un factor

importante, por lo que realizo mezclas con fibras de diferente longitud, encontrando los resultados, presentados en la figura 1.

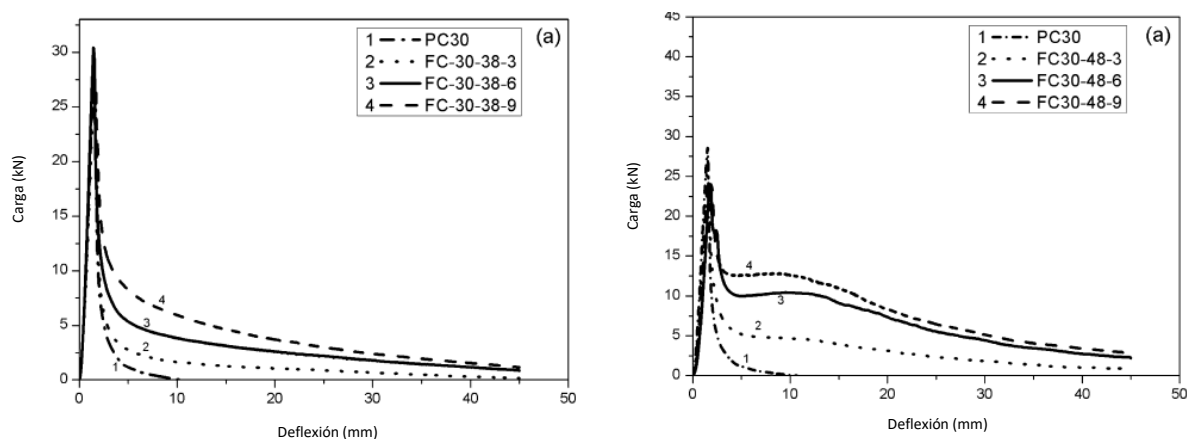


Figura 1: De izquierda a derecha, grafica de mezcla CPC 30 y fibra de 38mm. Mezcla de CPC 30 y fibra de 48mm. Zongcai, 2016.

De acuerdo con la figura 1 se observa que la fibra de 48mm de longitud exhibe que en el rango de 5.0 kN a 15.0 kN, una deformación de 4.0mm a 10.0mm, siendo visiblemente mejor que las fibras de 38.0mm de longitud, demostrando así que la longitud tiene un impacto importante en la capacidad de deformación del material.

De acuerdo con los requerimientos para un concreto lanzado convencional de acuerdo con ACI 506.5-22 “Specifying Underground Shotcrete – Guide”, existe el parámetro de **nivel de desempeño de tenacidad** (TPL), donde tanto el control y el hallazgo de estos se adjudican a una investigación [10]. Morgan en 1995 definió un modelo utilizando la prueba EN 14651 para evaluar el TPL del concreto lanzado, cuando este era reforzado exclusivamente por fibras de acero.

Morgan determinó que la resistencia residual a la flexión del espécimen, al momento de aparecer su primer agrietamiento, definiría que TPL se le debería de otorgar al material, que en este caso es un TPL igual a III, el mínimo requerido.

Sin embargo, este método no era viable en caso de utilizar fibras sintéticas debido a su comportamiento post agrietamiento. En la figura 2 se presenta el modelo propuesto por Morgan.

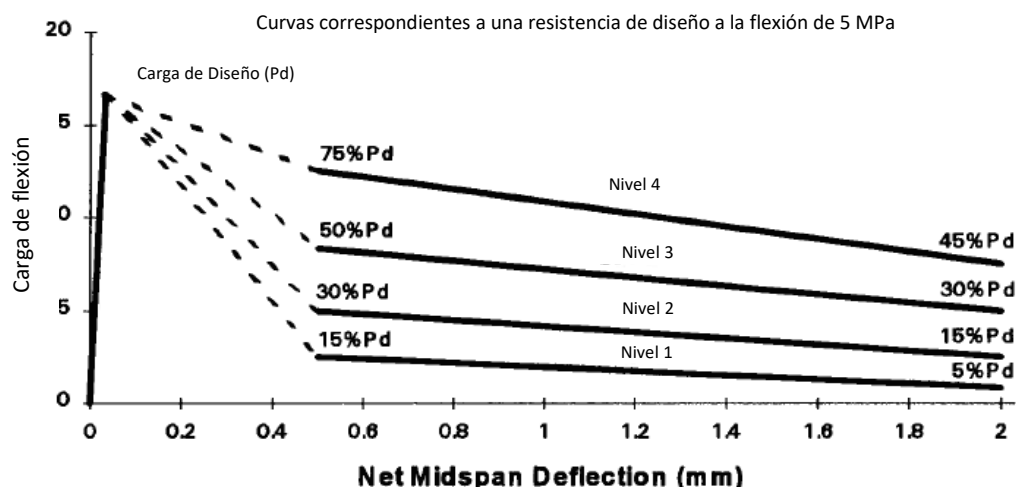


Figura 2: Modelo de definición para un TPL, Morgan 1195.

Como se observa en la figura 3, es difícil asignarle el TPL a una fibra sintética, ya que se podría clasificar como 2 o 3.

Por lo que siguiendo con este trabajo Morgan en 2005, define otro modelo para poder asignar un TPL a las fibras de cualquier material y que se pudiera hacer una comparación válida.

Proponiendo una relación entre los valores de la resistencia a la flexión de diseño del concreto lanzado y su resistencia a la flexión residual.

Es importante definir porque el TPL ya que es una propiedad requerida para el diseño de concreto con fibras. Dado que el ACI 506 define que la resistencia mínima a la compresión con la que se puede diseñar este tipo de concretos es de 400kg/cm^2 , se asume que tendrá una resistencia a la flexión de 4 Mpa, es decir el 10.0%.

De acuerdo con lo anterior se define que un TPL igual a 3, se cumple siempre y cuando la viga ensayada supere el 47.0% de 4 Mpa.

DIAGRAMA ESFUERZO-DEFLEXIÓN – ENSAYO DE TENACIDAD EN VIGAS

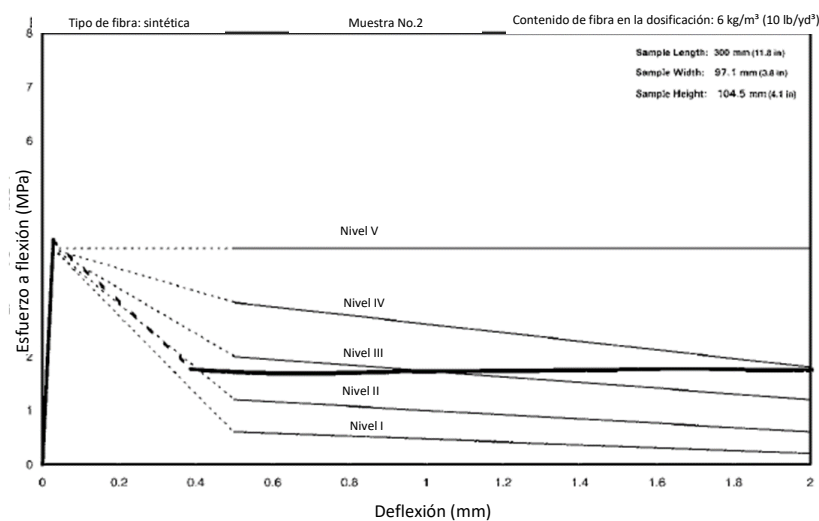


Figura 3: Definición del TPL para un concreto lanzado reforzado con fibras sintéticas. Morgan, 1995.

Estas relaciones se presentan en la tabla 6.

Tabla 6: Niveles de desempeño de tenacidad

Nivel de desempeño de tenacidad	Resistencia a la flexión residual como fracción de la resistencia a la flexión del diseño (4MPa)
5	>100%
4	>67 a 100%
3	>47 a 67%
2	>25 a 47%
1	>10 a 25%

A continuación, en la tabla 7 se presentan las características y propiedades para las cuales se realizará el diseño de mezcla de este trabajo de investigación.

Tabla 7: Características principales para un concreto lanzado típico.

Propiedad del concreto lanzado	Características comunes
Resistencia a compresión	Variación de 400–500 kg/cm ² en mezclas lanzadas por vía seca Variación de 300–500 kg/cm ² en mezclas lanzadas por vía húmeda
Resistencia a flexión	Utilización de malla de alambre soldado (proporciona ductilidad) o fibras de acero o sintéticas (proporciona tenacidad y capacidad para soportar cargas después del agrietamiento, controlan el agrietamiento y mejoran la resistencia al impacto)
Resistencia a la adherencia	Resistencia a tensión superior a 10 kg/cm ² , siendo la mínima de 7 kg/cm ² . La preparación de la superficie receptora influye en esta propiedad.
Contracción por secado	Tiene relación con el agrietamiento potencial y la reducción de la adherencia. Variación usual entre el 0.06 y 0.10% a 3 meses
Absorción y volumen de vacíos permeables	Indicación de la calidad del concreto lanzado. Volumen de vacíos permeables entre 14 y 17%. Absorción en Agua Hirviendo entre 6 y 9%
Densidad	Variación entre 2200 y 2400 kg/m ³ (concreto de alta calidad)
Módulo de elasticidad	Variación entre 170000 y 400000 kg/cm ² , aproximadamente.

Para las consideraciones de la mezcla, la relación grava/arena típica de una mezcla de concreto lanzado es 30/70 (Bracamontes, 2015); adicional a esto, se recomienda que se evalúe la distribución de tamaños al combinar ambos agregados para que cumplan con las granulometrías recomendadas por el manual del ACI 506.5-22 “*Guía para la especificación de concreto lanzado subterráneo*”.

Para la implementación de este nuevo método de diseño por superficie específica se toman en cuenta características de las fibras comerciales. El método de superficie específica toma en cuenta el diámetro, la densidad de la fibra y la longitud. Este método calcula la superficie de la fibra que estará en contacto con la matriz del concreto (despreciando las tapas del filamento), como se muestra a continuación.

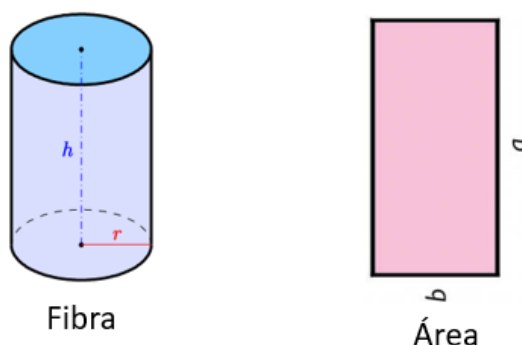


Figura 4: Geometría de una fibra

La superficie específica es una medida aplicada a sólidos con granos o partículas. Esta medida es importante porque muchos procesos físicos y químicos tienen lugar en la superficie de los sólidos. Para el caso de una fibra la superficie específica es el área disponible para estar en contacto con la matriz cementante.

Suponiendo que se cuenta con un filamento de una fibra que tiene como propiedades geométricas, un diámetro de 0.075 centímetros y una longitud de 3.50 centímetros, se realizará el cálculo de la superficie específica a continuación:

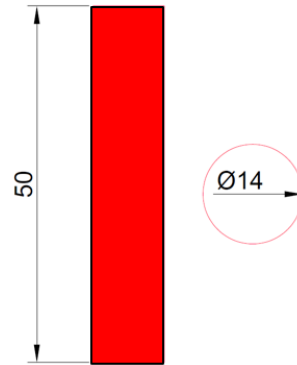


Figura 5: Dimensiones de una fibra para su cálculo de superficie específica

Primeramente, se calcula el perímetro del filamento:

$$P = (\pi)(14.0mm) = 44.0mm$$

Después se calcula la superficie específica del filamento:

$$SE = (44.0mm)(50.0mm) = 2200.0mm^2$$

CAPÍTULO 4.- MARCO TEÓRICO

La adición de fibras como refuerzo en el concreto ha sido objeto de una gran cantidad de estudios debido a la capacidad que tienen de mejorar el desempeño mecánico de este material[11], particularmente cuando se trata de un elemento que estará sometido a esfuerzos de tensión y flexión. Los principales beneficios de la inclusión de fibras en el concreto es que permiten controlar la propagación de grietas propias de la contracción del concreto, así como la capacidad de absorber energía, propiedad también conocida como **tenacidad**[12], propiedades que el concreto requiere tener para su aplicación en las construcciones modernas.



Figura 6: Concreto en estado fresco con fibras metálicas.

En el contexto de esta investigación, donde el trabajo de estudio es la evaluación del desempeño del concreto reforzado con fibras de diferentes materiales y características geométricas mediante ensayos de resistencia a la flexión, además de la determinación de los índices de tenacidad del material resultante de esta combinación, es indispensable establecer los conceptos necesarios para sustentar los procedimientos realizados y el análisis de la información resultante de los mismos.

De esta forma este capítulo presenta los conceptos fundamentales relacionados con el concreto convencional, el concreto reforzado con fibras, los diferentes tipos de fibras que se emplean en la industria de la construcción y cuales son los beneficios de adicionarlas a una matriz de concreto. Asu vez, se desarrolla el concepto de la tenacidad en el concreto con fibras, la forma en que se mide esta propiedad junto a sus respectivos ensayos y la evaluación del comportamiento de las fibras una vez se alcanza la falla del concreto, es decir, su comportamiento post agrietamiento.

4.1 Concreto

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción en el mundo, dado su versatilidad, durabilidad y que es relativamente económico[13]. El concreto es una mezcla compuesta por cemento, agua y agregados finos y gruesos, siendo en este caso estos agregados calizos provenientes de la región de Nuevo León, que es donde se realiza este trabajo de investigación. A esta mezcla se le pueden añadir aditivos para dotar al concreto de otras propiedades químicas que por sí solo no tiene y finalmente la adición de fibras como mejoramiento en términos mecánicos del material.



Figura 7: Concreto en estado fresco.

El desempeño del concreto esta determinado por la interacción entre sus componentes. Durante la hidratación del concreto, la cual es la reacción química que ocurre en cuanto el cemento entra en contacto con el agua, se generan compuestos químicos que permiten el endurecimiento[14] de la mezcla y permiten que el material se vuelva solido para resistir cargas externas. Entre las propiedades mas importantes del concreto se encuentran su resistencia a la compresión, su capacidad para resistir las condiciones externas mientras mantiene su funcionalidad, denominada como durabilidad y la trabajabilidad medida a través de una prueba de revenimiento.

Pese a todas estas bondades, el concreto carece de una propiedad la cual es la resistencia a la tensión, debido a su naturaleza frágil. De acuerdo con la literatura, la resistencia a la tensión de un concreto esta dada en relación de un 10.0% al 15.0% de su resistencia a la compresión[15]. Al no poder resistir estos esfuerzos de tensión, la aparición de grietas en el concreto se convierte se vuelve muy común. Debido a esto, se empezó a utilizar el acero como un material de refuerzo con en el concreto para absorber estos esfuerzos de tensión y flexión[16].

4.2.- Concreto reforzado con fibras

El concreto reforzado con fibras es un material resultante de la adición de cualquier tipo de fibra a una matriz de concreto con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas[17]. Los filamentos se distribuyen de manera uniforme y discontinua dentro de la matriz, actúan como un refuerzo con la finalidad de disminuir la aparición de agrietamientos y mejorar el comportamiento del concreto ante esfuerzos de tensión y flexión.

La función principal de las fibras dentro del concreto es actuar como un puente que permite transmitir los esfuerzos que generan las grietas. Cuando se produce la falla del concreto, las fibras limitan que la fisura se extienda, de esta manera pese a que el concreto falló las fibras siguen soportando el esfuerzo al que se está sometiendo el elemento[18].



Figura 8: Viga de concreto reforzada con fibras.

En la actualidad, el concreto reforzado con fibras tiene muchas aplicaciones, como lo serian; pisos industriales, revestimiento de taludes, recubrimiento de túneles, losas y elementos prefabricados.

4.3 Fibras

Las fibras son elementos de refuerzo de diámetro pequeño, junto con una longitud determinada, a la relación que existe entre la longitud del filamento y su diámetro se le denomina relación aspecto. Las fibras se adicionan al concreto con la finalidad de modificar sus propiedades mecánicas.

De acuerdo con las propiedades de la fibra, estas pueden modificar el comportamiento del concreto, estas propiedades son:

- Geometría de la fibra.
- Relación aspecto.
- Módulo de elasticidad.
- Resistencia a la tensión.
- Dosificación en un diseño de mezcla.
- Adherencia entre el filamento y la matriz de concreto.

4.3.1.- Tipos de fibra

Existen diferentes formas de clasificar a las fibras que se utilizan en la industria del concreto. En primera instancia se pueden clasificar por su tamaño, clasificándose como microfibras y macrofibras.

Microfibras

Las microfibras poseen dimensiones relativamente pequeñas, generalmente inferiores a 20 mm de longitud. Su principal función es controlar la formación de fisuras por retracción plástica y reducir la propagación de microgrietas durante las primeras etapas del endurecimiento[19]. Generalmente el uso de las microfibras es en función de controlar la aparición de grietas mismas por la contracción en el concreto.

Las microfibras mas utilizadas en la industria son las siguientes:

- Polipropileno.
- Fibra de vidrio.
- Nylon.



Figura 9: Fibra de polipropileno.

Macrofibras

Las macrofibras presentan longitudes superiores a 20 mm y son capaces de contribuir significativamente a la resistencia residual del concreto. Estas fibras participan activamente en el control de grietas estructurales y en la capacidad de absorción de energía del material[20].

Las macrofibras son principalmente utilizadas en:

- Túneles.
- Revestimiento de taludes.
- Pisos industriales.
- Concreto lanzado.

A su vez, se pueden clasificar las fibras por el material el cual están hechas:

Fibras de acero

Son el tipo de fibras más utilizadas en la industria de la construcción, cuyas aplicaciones son estructurales debido a su alto módulo de elasticidad del acero, además de que pueden sustituir parcialmente el acero de refuerzo dependiendo del elemento o estructura que se quiera construir[21].

Mejoran principalmente las siguientes propiedades en el concreto:

- Resistencia residual.
- Tenacidad.
- Resistencia al impacto.

Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas se fabrican a partir de polímeros como:

- Polipropileno.
- Polietileno.

- Nylon.
- Poliéster.

Se caracterizan por su resistencia a la corrosión y bajo peso específico. Dependiendo de su tamaño, pueden emplearse para controlar fisuración temprana o proporcionar resistencia residual significativa.

4.4.- Tenacidad

Se define a la tenacidad como la capacidad que posee un material para absorber energía y deformarse antes de alcanzar la falla. Mientras que un concreto convencional presenta una falla frágil inmediatamente después del agrietamiento, el concreto fibroreforzado mantiene una capacidad significativa para soportar carga debido a la acción de las fibras[22].

La tenacidad está directamente relacionada con la cantidad de energía absorbida durante el proceso de carga y deformación. Esta propiedad constituye uno de los principales indicadores del desempeño post-agrietamiento del concreto reforzado con fibras[23].

La evaluación de la tenacidad permite determinar la capacidad del concreto para resistir eventos que generan deformaciones importantes.

Su importancia radica en que proporciona información sobre:

- Capacidad de absorción de energía.
- Comportamiento post-agrietamiento.
- Resistencia residual.
- Seguridad estructural.
- Desempeño frente a cargas dinámicas.

En aplicaciones como pavimentos, túneles y elementos sometidos a impacto, la tenacidad constituye un parámetro fundamental para el diseño y evaluación del material.

La tenacidad puede determinarse mediante ensayos de flexión que permiten registrar la respuesta carga-desplazamiento o carga-apertura de grieta. La energía absorbida se calcula como el área bajo la curva obtenida durante el ensayo.

Para este trabajo de investigación se evaluó la tenacidad del concreto fibro reforzado mediante la norma EN 14651 “Test method for metallic fibered concrete Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual”.



Figura 10: Ensayo de una viga mediante la norma EN 14651.

Es una de las normas más utilizadas para caracterizar concretos fibroreforzados.

El ensayo emplea vigas entalladas sometidas a flexión y registra la relación entre carga y apertura de grieta (CMOD).

A partir de los resultados se determinan:

- Resistencia residual f_{R1} .
- Resistencia residual f_{R2} .
- Resistencia residual f_{R3} .

- Resistencia residual f_{R4} .

Estos parámetros permiten evaluar la capacidad de transferencia de esfuerzos después del agrietamiento.

La tenacidad depende directamente de las características de las fibras utilizadas.

Factores como la dosificación, longitud, geometría, módulo de elasticidad y adherencia influyen significativamente en la capacidad de absorción de energía del concreto.

En general, un aumento en el contenido de fibras incrementa la tenacidad y la resistencia residual. Sin embargo, dosificaciones excesivas pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla y generar problemas de dispersión.

Por ello, es necesario determinar experimentalmente la dosificación óptima que permita maximizar el desempeño mecánico sin comprometer las propiedades del concreto fresco.

CAPÍTULO 5.- METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo de investigación se utilizó un cemento portland compuesto de resistencia de 40Mpa (CPC 40) de la marca Moctezuma. En el caso de los agregados se utilizó agregado calizo de la región Noreste de México, para el agregado fino se utilizó arena #4 (4.75mm), en el caso del agregado grueso se utilizó grava cribada de 3/8", es decir, solo se utilizó el material que tenía este tamaño. Se hizo uso de la adición al diseño de mezcla de un "filler", en este caso es polvo de caliza, este material no produce ninguna reacción química en la mezcla, su uso es para rellenar la mayor cantidad de vacíos dentro de la matriz de concreto. Para el uso de aditivos se requirió del uso de un superfluidificante base policarboxilato (Flowcon P01), además de un aditivo acelerante base cloruros (Sureshot SF).

Para las fibras objeto de investigación, se utilizaron fibras comerciales, es decir, que no se les hizo ningún tratamiento previo o modificación. Se utilizaron 2 fibras de acero, 2 fibras de polipropileno y 2 fibras de alcohol polivinílico, que a su vez cuentan con diferentes diámetros y longitudes, de esta manera poder estudiar como influyen cada una de estas variables en el comportamiento mecánico del concreto.

En la tabla 8 se presentan los materiales a utilizar en este trabajo de investigación.

Tabla 8: Características de los materiales.

ID	Material	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
AC1	Fibra Acero	0.55	35	210	7.80	---
AC2	Fibra Acero	0.55	33	210	7.80	---
BC	Fibra Polipropileno	0.70	54	9.0	0.91	---
PP	Fibra Polipropileno	0.69	51	9.5	0.92	---
K	Fibra Alcohol polivinílico	0.66	30	12.0	0.91	---
EN	Fibra Alcohol polivinílico	0.70	50	12.0	0.91	---
---	Cemento	---	---	---	3.10	---
---	Ag. Grueso	---	---	---	2.60	0.66
---	Ag. Fino	---	---	---	2.70	2.6
---	Polvo de caliza	---	---	---	2.70	---

Se decidió que la fibra sintética “Bc”, sea tomada como referencia, al ser la fibra que presenta el diámetro más grande, de manera que la superficie específica obtenida por esta fibra en los porcentajes de 1.0%, 1.5% y 2.0% serán los valores que permitirán dosificar las fibras estructurales restantes para este trabajo.

Para la caracterización de los materiales:

ASTM C 188 – Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico. Este método de prueba cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Se utilizará para realizar un correcto diseño y control de la mezcla de concreto.

ASTM C 127 – Densidad y absorción de agregado grueso. Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa y su absorción.

ASTM C 128 – Densidad y absorción de agregado fino. Este método de prueba cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, la densidad relativa y su absorción.

Para el análisis de las mezclas en estado fresco:

ASTM C143 - Prueba de revenimiento para concreto hidráulico. La trabajabilidad de la mezcla es una de las características más importantes que se quieren controlar debido a la forma de colocación del concreto lanzado, se busca obtener un revenimiento de 160 ± 20 mm.

ASTM C 231 – Contenido de aire en el concreto por el método de presión. Este método de ensayo trata sobre la determinación del contenido de aire del concreto recién mezclado a partir de la observación del cambio de volumen del concreto por un cambio de presión.

ASTM C 138 – Masa unitaria. Este método trata sobre la determinación de la densidad del concreto fresco y entrega fórmulas para calcular el volumen producido, el contenido de cemento y el contenido de aire del concreto.

ASTM C 31 - Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto.

Para el análisis de las mezclas en estado endurecido:

Se realizarán 3 especímenes para cada una de las siguientes pruebas, para cada una de las diferentes mezclas a realizar en este trabajo. Todos los especímenes serán ensayados a una edad de 56 días, con tiempo de curado no menor a 3 días.

EN 14651 “Test Method for metallic fibered concrete – Measuring the Flexural tensile strenght”. Se realiza el espécimen de una viga con las dimensiones mostradas en la figura 6, que se somete a una carga que es controlada por deformación, esta prueba permitirá determinar el nivel de desempeño de tenacidad (TPL) el cual es un parámetro que se tiene que controlar para dar validez a que la matriz utilizada es de concreto lanzado. Se realizarán Esta prueba permite obtener la resistencia a la flexión para definir el TPL del material.

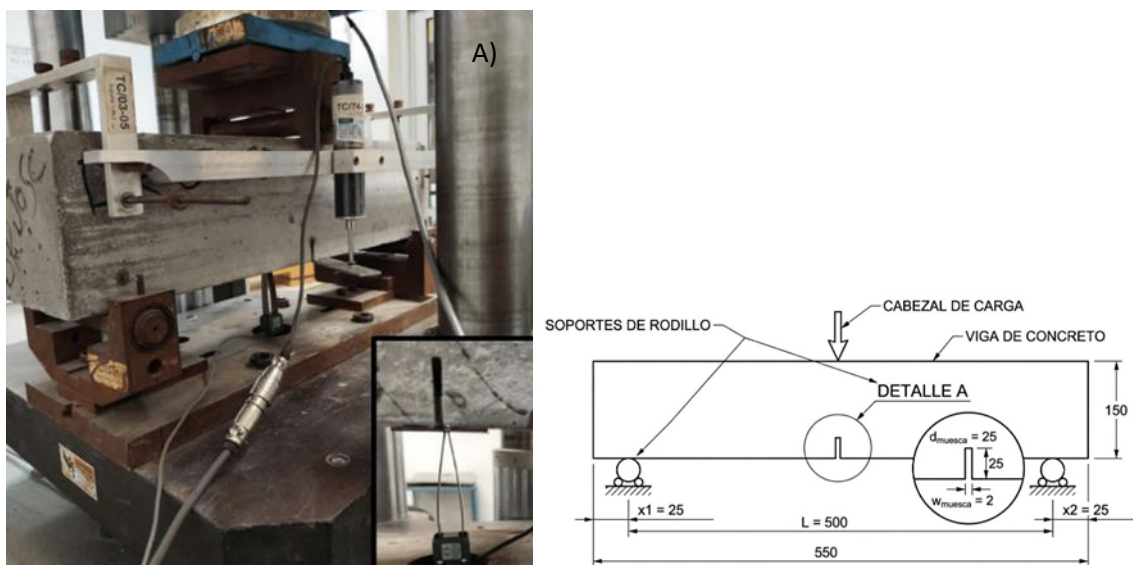


Figura 11: Dimensiones del espécimen de acuerdo a la norma EN 14651. A) “Desarrollo de concreto de ultra alto comportamiento, utilizando arcilla vitrificada como sustituto de agregado y del material cementante.”

Para esta prueba se realizarán 3 especímenes por cada una de las 28 mezclas, se decide usar 3 especímenes ya que se tienen todas las condiciones controladas dentro del laboratorio de tecnología del concreto, de manera que se evitara el sesgo de resultados, salvo por una mala preparación de un espécimen. Los especímenes serán curados por 3 días y ensayados a 56 días de edad. El resultado de esta prueba es la capacidad de absorción de energía del material.

ASTM C 39 “Resistencia a la compresión en cilindros de concreto”. Se realizará esta prueba para medir la resistencia a la compresión del concreto, buscando lograr un f'_c de 400 kg/cm² a los 28 días. Además, la finalidad de esta prueba será generar una curva de desarrollo de resistencia para cada una de las mezclas, por lo que se producirán 2 cilindros para evaluar a los 28 días, 3 cilindros para evaluar a los 56 días[24].

5.1 Caracterización de las fibras

Se realizó la caracterización de todas las fibras que se utilizarían en el presente trabajo con el fin de identificar la morfología de las mismas, de la misma forma para obtener el diámetro real de un filamento.

El procedimiento para observar las propiedades geométricas de cada una de las fibras se hizo mediante una microscopia electrónica de barrido. Este método consiste en que mediante un equipo lanza un haz de electrones a un objeto sólido con un recubrimiento de oro con el objetivo de hacerlos conductores, además mejora el contraste y la resolución con la cual se pueden obtener imágenes.

Observar la morfología de los filamentos permitirá inferir como las diferencias entre las propiedades geométricas de las fibras tienen efecto sobre la adherencia entre las fibras y la matriz de concreto.

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas para cada una fibra, las cuales se obtuvieron con una resolución de 100 aumentos.

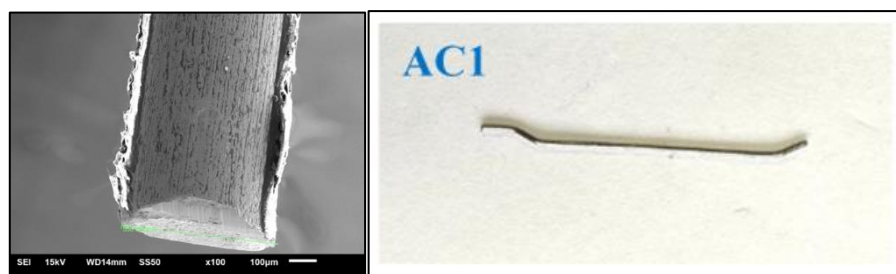


Figura 12: Imagen SEM para la fibra Ac1.

Se puede apreciar en la figura 12, el cuerpo de un filamento de la fibra Ac1 no es completamente liso, las imperfecciones observadas explican la mejor adherencia presentada entre la longitud del filamento y la matriz de concreto. Por si sola la fibra de acero mejora de manera considerable la tenacidad del concreto debido a que cuenta con un alto módulo de elasticidad.

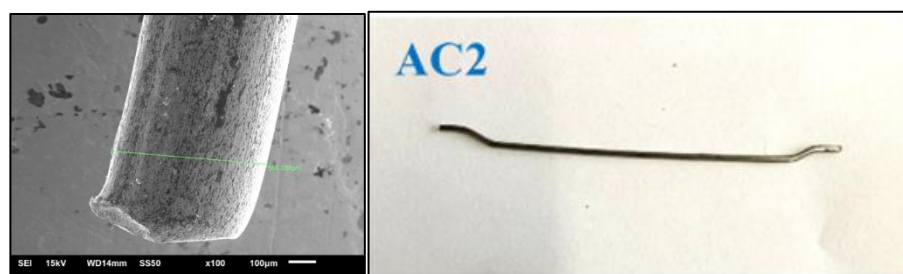


Figura 13: Imagen SEM para la fibra Ac2

Se puede apreciar en la figura 13 el cuerpo del filamento, al medir el diámetro con el microscopio electrónico de barrido se observa que coincide con lo mencionado dentro de la ficha técnica del proveedor. El filamento no presenta ninguna irregularidad o imperfección en su longitud, siendo completamente simétrica. De la misma manera que con la fibra “Ac1”, la fibra “Ac2” presenta estas imperfecciones en su superficie y a su vez mejora la adherencia entre el filamento y la matriz de concreto.

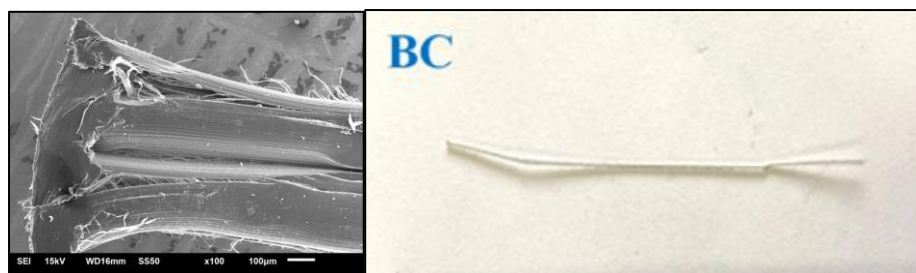


Figura 14: Imagen SEM para la fibra Bc.

Para la obtención de estas imágenes, a las fibras sintéticas se les hizo un recubrimiento de oro, de esta manera pudieron ser observadas por el microscopio. En la figura 14 se observa la fibra “Bc” apreciando que el filamento parece que se divide en filamentos aún más delgados. En la figura 9 se observan estos filamentos más delgados, esto es debido a que este tipo de fibra en particular es fibrilada, es decir que un filamento este compuesto de filamentos

más pequeños, lo que explica el comportamiento que esta fibra tiene en la mezcla, ya que al utilizarla se generan “erizos” además de reducir de manera significativa la trabajabilidad del concreto.

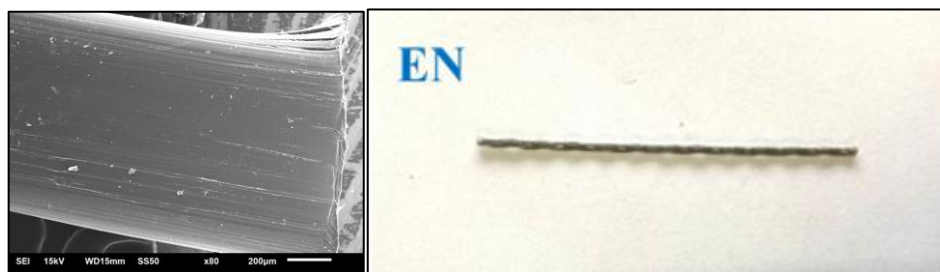
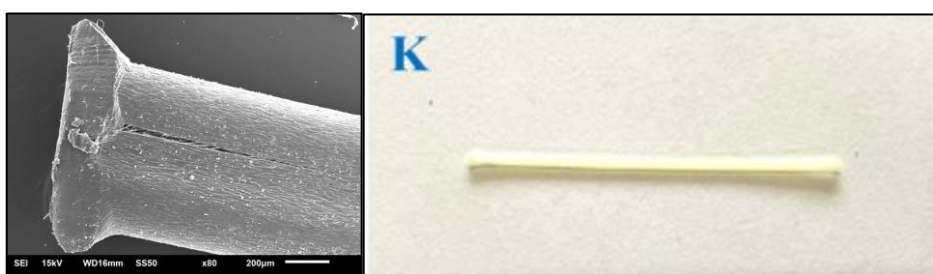


Figura 15: Imagen SEM para la fibra En.

A diferencia de la fibra “Bc”, en la figura 15, la fibra “En” no es fibrilada y no se observa esta separación en el filamento, por el contrario, presenta una cierta rigidez mayor respecto a las demás fibras sintéticas de este trabajo de investigación. De la misma forma el filamento presenta una forma ondulada, distinta a todas las fibras ya que son rectas en su mayoría. Esta forma ondulada permite que la adherencia entre el filamento y la matriz de concreto, esto se observa en los resultados ya que esta es la fibra sintética es la que presenta la



mayor tenacidad en el concreto.

Figura 16: Imagen SEM para la fibra K.

En la figura 16 se observa la fibra “K”, el filamento también presenta una rigidez considerable y no tiene este comportamiento fibrilado, esta fibra es la que presenta el segundo mejor comportamiento respecto a la tenacidad en el concreto de acuerdo con las otras fibras de material sintético.

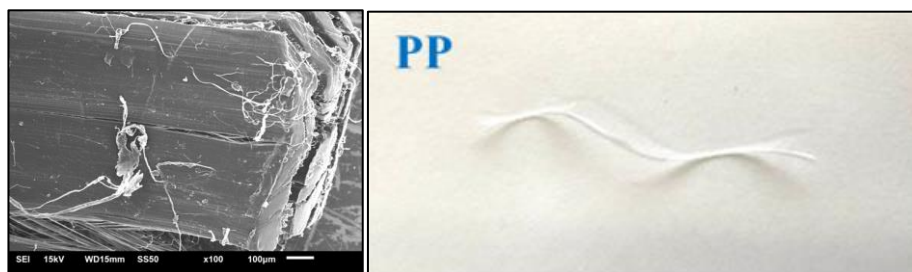


Figura 17: Imagen SEM para la fibra PP.

En la figura 17 se observa que la fibra “PP” presenta este comportamiento fibrilado, se aprecia que el filamento se separara en filamentos más delgados, no obstante, no genera la perdida de trabajabilidad que presenta la fibra “Bc”. Además, el filamento presenta una superficie prácticamente lisa junto con una flexibilidad mayor al resto de las fibras, por lo que explica porque la mejora en cuanto a la tenacidad no es tan grande.

5.2 diseño de mezcla

Para llevar a cabo esta investigación, se decidió utilizar una mezcla de concreto con un $f'c=400\text{kg/cm}^2$, para un revenimiento $160\text{mm} \pm 350\text{mm}$ con un tamaño máximo del agregado de $3/8"$ (10mm), además se estableció un parámetro para el diseño de concreto fibroreforzado de acuerdo con el ACI 506, es decir, un Toughness performance level (TPL) de 3, con el fin de tener una especificación de desempeño del concreto desde un punto de vista de tenacidad.

En la tabla 9 se pueden observar el proporcionamiento de mezcla con su respectiva superficie específica para cada una de las fibras.

Tabla 9: Proporcionamiento de mezclas de concreto por superficie especifica y volumen

Mezcla	Diseño de Mezcla (kg/m³)												
	Agu a	ceme nto	PC	A. Fino	A. Grues o	Aditivo Químico		Fibras					
						Super Plastif .	Aceler .	Superficie Especifica			volumen		
Referencia	168	350	32	1006	754	4	13	-	-	-	-	-	-
AC1 1.0%	168	350	32	1079	687	4	13	533,333.3	-	-	0.73	-	-
AC1 1.5%	168	350	32	1073	684	4	13	-	800,000.00	-	-	1.1	-
AC1 2.0%	168	350	32	1067	679	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.5
AC2 1.0%	168	350	32	1079	687	4	13	533,333.3	-	-	0.73	-	-
AC2 1.5%	168	350	32	1073	684	4	13	-	800,000.00	-	-	1.1	-
AC2 2.0%	168	350	32	1067	679	4	13	-	-	1,066,666.67	-	-	1.5
BC 1.0%	168	350		1089	693	4	13				1.0		
PP 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.3	-	-	0.92	-	-
PP 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000.00	-	-	1.38	-

PP 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,66 6.67	-	-	1. 84
K 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.3 3	-	-	0.8 7	-	-
K 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000.0 0	-	-	1.3 0	-
K 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,66 6.67	-	-	1.7 5
EN 1.0%	168	350	32	1089	693	4	13	533,333.3 3	-	-	0.9 3	-	-
EN 1.5%	168	350	32	1089	693	4	13	-	800,000.0 0	-	-	1.4	-
EN 2.0%	168	350	32	1088	692	4	13	-	-	1,066,66 6.67	-	-	1.8 5

5.3.- Proceso de mezclado

A continuación, se describe el proceso de mezcla con el cual se fabricó el concreto para todas las muestras obtenidas para este trabajo.

Se humedece la mezcladora, esto con la finalidad de que las paredes de ésta no absorba parte del agua de mezclado, lo que podría afectar con reducir el revenimiento de la mezcla. Primeramente, se adiciona la grava de 3/8 junto con la arena # 4, se mezcla durante un minuto en seco para homogenizar los agregados.



Figura 18: Mezcladora humedecida.

Después de mezclar los agregados durante 1 minuto, mientras la mezcladora sigue girando se adiciona parte del agua de mezcla, esto con la finalidad de alcanzar la condición saturada superficialmente seca (SSS), de esta manera los agregados no absorberán agua de reacción del cemento. Una vez que se observe que el agregado alcance esta condición se detiene la mezcladora.



Figura 19: Homogenización de los agregados.

Después se agrega el cemento, el polvo de caliza junto el resto del agua de mezcla, una vez que se observe que el cemento haga reacción con el agua, se procede a añadir los aditivos. Se añade primero el aditivo superfluidificante, esto sin detener la mezcladora, para que el aditivo se homogenice en toda la mezcla.

Pasados 3 minutos de mezclado se detiene la mezcladora y se deja reposar la mezcla durante 3 minutos con la finalidad de que el aditivo base polycarboxilato termine de reaccionar.



Figura 20: Adición de cemento, polvo de caliza y aditivos.

Finalmente se vuelve a mezclar el concreto durante 3 minutos, durante esta parte del mezclado se adiciona el aditivo acelerante base cloruros, además mientras se está mezclando se van adicionando las fibras en pequeñas cantidades de esta manera se asegura que se distribuyan de manera uniforme en todo el volumen producido.



Figura 21: Adición de las fibras.

Una vez terminado el proceso de mezclado para obtener el concreto fibro-reforzado se procede a la fabricación de los especímenes necesarios. Los siguientes pasos cubren el proceso de la fabricación de las vigas con medidas de 15 cm x 15 cm x 60 cm para su posterior ensayo a la resistencia a la flexión residual.

Se vacía la mezcla en una carretilla previamente humedecida para evitar que absorba agua del concreto y por consiguiente disminuya el revenimiento de la mezcla. Se transporta al lugar donde se colarán las vigas, en este caso es en un cuarto que mantiene una temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Se homogeniza la mezcla en la carretilla previamente a su vaciado en los moldes, esto también permite observar de manera anticipada la distribución de las fibras en la mezcla, pudiendo notar si se generó una acumulación de filamentos en alguna zona.



Figura 22: Mezcla en carretilla.

Después se realiza el llenado de las vigas previamente recubiertas con desmoldante, de acuerdo con la norma EN-14651, utilizando una mesa de vibrado y una llana para darle un acabado liso a la viga. Se realiza el llenado de las vigas en 2 capas, cada capa es vibrada durante 30 segundos por la mesa vibratoria, además haciendo uso de una espátula, esta se ingresa en los costados del molde para garantizar un correcto llenado del mismo.



Figura 23: Llenado de la viga sobre la mesa de vibrado.

Posteriormente se cubren los especímenes durante 24 horas, cumpliendo el tiempo de fraguado para después desmoldarse, se identifican y se llevan al cuarto de curado donde se mantienen a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y sumergidos en agua saturada con cal[25].



Figura 24: Vigas colocadas en cuarto de curado.

6.- DISCUSION DE RESULTADOS

Caracterización de los materiales.

Para el uso de los materiales de mezcla se obtuvieron las propiedades físicas necesarias para realizar el diseño de mezcla, dichas propiedades se presentan en la tabla 10.

Tabla 10: Resultados de la caracterización de los materiales

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm ³)	ABSORCIÓN (%)
Cemento	3.1	
Ag. Grueso	2.6	0.66
Ag. Fino	2.7	2.6
Polvo de caliza	2.7	

Curva de desarrollo de resistencia.

Se tienen los resultados de la resistencia a compresión en cilindros de concreto de la mezcla de referencia (sin fibras), hasta una edad de 56 días. Los resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla de referencia se muestran en la tabla 11, mientras que el desarrollo de resistencia a la compresión en concreto reforzado con cada una de las fibras del trabajo se presenta en la figura 25.

Tabla 11: Desarrollo de resistencia a la compresión

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
SERIE	EDAD	F'c (Kg/cm2)
CURVA DE DESARROLLO DE RESISTENCIA	14	382.7
	28	425.1
	56	480.4

De la misma forma se tienen los siguientes resultados respecto a la resistencia a la compresión en cilindros de concreto para las mezclas que contienen fibras en sus porcentajes previamente mencionados. Se presentan en la figura 25.

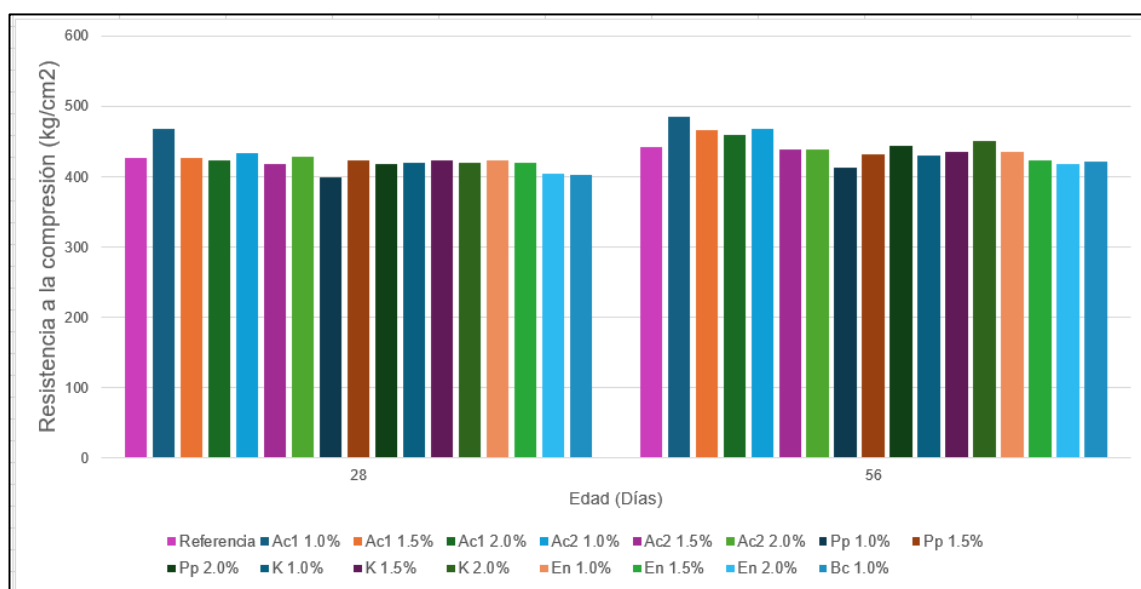


Figura 25: Resistencia a la compresión en cilindros de concreto.

La resistencia a la compresión de todas las mezclas se encuentra aproximadamente entre 400 y 490 kg/cm², mostrando un desarrollo de resistencia relativamente similar entre ellas. Se observa una ligera tendencia al incremento de la resistencia cuando la edad de los especímenes aumenta a los 56 días, el aumento es ligeramente significativo, ya que todas las resistencias registran un aumento de al menos del 10.0% respecto a los 28 días. De haber usado una puzolana es probable que el aumento de resistencia de los 28 a 56 días sea mayor, ya que las puzolanas tienen la cualidad de presentar desarrollo de resistencias en edades tardías[26].

Por lo que en primera instancia se puede saber que el diseño de mezcla cumple con la resistencia a la compresión de diseño, después de esto se debe de analizar la influencia de las fibras en esta propiedad mecánica.

Respecto al comportamiento de las fibras en el comportamiento mecánico a compresión, una tendencia notable es que conforme aumenta la cantidad de fibras en el cilindro de concreto, la resistencia a la compresión disminuye, esto se debe a que las fibras están utilizando un volumen dentro de la matriz de concreto, por lo que se reduce la cantidad de pasta de cemento en el cilindro.

Dicho esto, se sabe que cuando un elemento que trabaja a compresión, la pasta es el material que resiste este esfuerzo y mantiene la integridad del elemento, al agregar un mayor volumen de fibra, disminuye la cantidad de pasta y la resistencia a la compresión baja[27]. A su vez se genera un desprendimiento más rápido del filamento de la matriz de concreto, por lo que se induce la falla del cilindro.

De la misma forma la pérdida de resistencia también se puede atribuir que al haber más fibras, se pierde trabajabilidad, a su vez, puede haber más presencia de vacíos en la matriz, por donde podrían conducirse los agrietamientos de manera más sencilla. Además, la falla está relacionada a la adherencia que puede existir entre el filamento y la matriz, donde una peor continuidad de la matriz de concreto con la fibra, favorece el arrancamiento (pull out) del filamento[28].

6.1 ABSORCIÓN DE ENERGIA Y TENACIDAD EN LA NORMA EN 14651

Después de realizar los ensayos de la viga ranurada para las mezclas se graficaron los siguientes resultados.

Los resultados obtenidos hasta el momento involucran los ensayos de resistencia a la flexión residual (RFR) en los especímenes de vigas ranuradas. A continuación, se presentan los resultados para cada porcentaje de sustitución y tipo de fibra, los cuales se evaluaron con base en la norma EN 14651[29] y al trabajo de Morgan, D[10]. Para el cálculo de los índices de tenacidad la evaluación se realizó con base en al artículo de Ferdosian[30].

Para una clara interpretación de los resultados que se presentan a continuación en las figuras de la 8 a la 22 y en las tablas de la 12 a la 26, a continuación, se definen las abreviaciones involucradas:

TPL, es un parámetro utilizado para evaluar el desempeño de la tenacidad de un concreto fibroreforzado, existiendo 5 niveles (1-5), siendo que para este tipo de concreto convencionales el nivel requerido es de 3, que se define mediante una fracción de la resistencia a la flexión de diseño del concreto, la cual en el caso de este trabajo de es 4MPa. Para cumplir con este parámetro, la Resistencia a la flexión residual que se define cuando la ranura alcanza los 0.5mm en el ensayo de la viga ranurada debe de ser mayor al 47.0% de los 4MPa, lo que equivale a 1.88 MPa.

FL, F1, F2, F3 y F4, estos son puntos que se deben de reportar de acuerdo a la norma EN 14651 y se identifican de acuerdo a la deformación que la viga va desarrollando a lo largo del ensayo, estos se encuentran cuando falla el concreto, cuando la abertura de la ranura es a 0.5mm, a 1.5mm, a 2.5mm y a 3.5mm respectivamente.

I5, I10 e I20, estos índices de tenacidad representan la fuerza retenida después de la falla del concreto, cuantificando a la carga post-agrietamiento en un intervalo de deflexión definido.

R (5,10) y R (10,20), representan un factor de fuerza residual del material e indican que tan bien el material se comporta en el rango elástico o plástico y en el antes y después de la falla del concreto.

Las áreas mencionadas en la tabla de “áreas bajo la curva = tenacidad” indican el cálculo de la capacidad de la absorción de energía de debajo de cada uno de los 7 puntos que se muestran en las gráficas.

6.1.1 Fibra de Acero AC1-1.0%

A continuación, en la Figura 21 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión residual, así como los índices de tenacidad correspondientes.

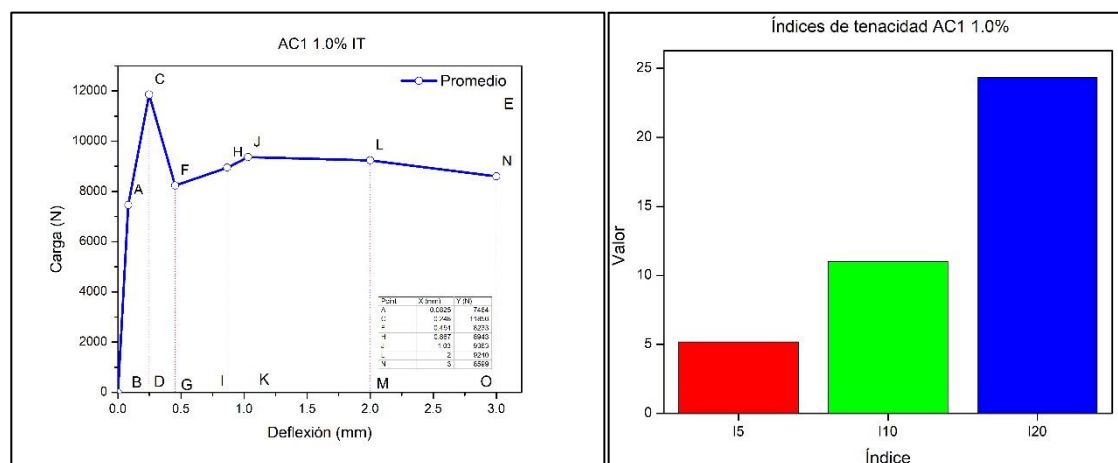


Figura 26: Resistencia a la flexión residual y tenacidad acumulada AC1 1.0%

Posteriormente, en la Tabla 12 se muestran los datos derivados del ensayo, incluyendo la tenacidad acumulada aportada por la fibra en el concreto y la localización de los esfuerzos F, de acuerdo con lo establecido en la norma EN 14651.

Tabla 12: Índices de tenacidad AC-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.2	2.58	3.26	3.38	2.74
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
188%		2.58		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		6.18		
Índice I10		12.91		
Índice I20		24.41		
R(5,10)		134.57		
R(10,20)		115.05		
Tenacidad				
Área bajo la				
Área	curva	Área acumulada		
	(Joules)	(Joules)		
1	307.91	307.91		
2	1593.96	1901.81		
3	2071.75	3973.62		
4	3542.81	7516.43		
5	1510.39	9026.82		
6	9011.25	18038.06		
7	8919.710	26957.77		

Al realizar el ensaye, se observa como la adición de la fibra metálicas en este porcentaje, mejora la resistencia a la flexión del concreto, el pico de su resistencia aumenta, sin embargo, una vez alcanzada la falla del elemento, las fibras mantienen un comportamiento estable a lo largo de la deformación, lo cual indica que no aumenta la resistencia al esfuerzo sometido, pero mantiene la estabilidad,

así mismo indica que en este porcentaje no existe el endurecimiento por deformación.

6.1.2 Fibra de Acero AC1-1.5%

La Figura 22 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual y los índices de tenacidad calculados.

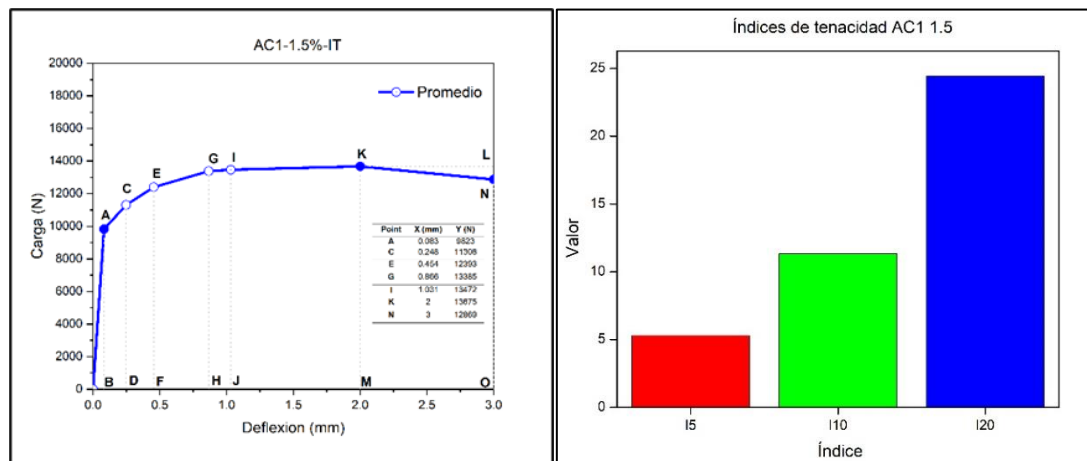


Figura 27: Resistencia a la flexión residual y tenacidad acumulada AC1 1.5%

De manera complementaria, la Tabla 13 reúne los valores obtenidos durante el ensayo, destacando la tenacidad acumulada proporcionada por las fibras en el concreto y las posiciones de los esfuerzos FFF definidas por la norma EN 14651.

Tabla 13: Índices de tenacidad AC1-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.7	3.75	4.51	4.53	4.09
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
188%		2.53		

Índices de tenacidad		
Índices		Valor
Índice I5		5.3
Índice I10		11.33
Índice I20		24.64
R(5,10)		120.64
R(10,20)		131.21
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	
	(Joules)	Área acumulada (Joules)
1	405.19	405.19
2	1743.32	2148.51
3	2444.22	4592.73
4	5316.71	9909.44
5	2215.71	12125.15
6	13149.51	25274.66
7	13271.96	38546.62

En esta serie de vigas, se tuvo que descartar una de ellas debido a que su comportamiento presentaba una diferencia muy notoria respecto a las otras dos, por lo que al trazar la línea promedio esta se veía disminuida. Esta es una de las dificultades que se presentaron a lo largo de los diferentes ensayos.

En la gráfica de tenacidad acumulada se puede observar que después del límite establecido por “Ferdosian, et al”[30], el material sigue absorbiendo energía lo cual indica la mejora del comportamiento mecánico gracias a la adición de las fibras.

6.1.3 Fibra de Acero AC1-2.0%

En la Figura 23 se ilustran los resultados correspondientes a la resistencia a la flexión residual y a los índices de tenacidad obtenidos experimentalmente.

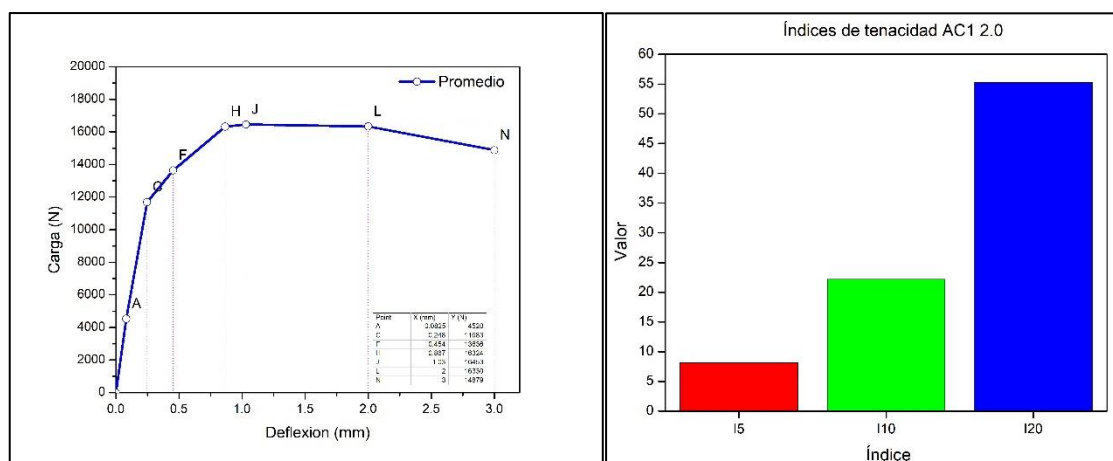


Figura 28: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC1-2.0%

Asimismo, la Tabla 14 presenta los datos recopilados durante el ensayo, entre los que se incluyen la tenacidad acumulada generada por el refuerzo fibroso y la ubicación de los esfuerzos F conforme a los criterios establecidos en la norma EN 14651.

Tabla 14: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC1-2.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
5.7	4.75	5.44	5.28	4.94
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		4.75		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			8.17	
Índice I10			22.17	

Índice I20		55.31
R(5,10)		280.05
R(10,20)		331.37
Tenacidad		
Área bajo la		
Área	curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	186.48	186.48
2	1336.81	1523.29
3	2611.07	4134.36
4	6179.32	10313.68
5	2704.17	13017.85
6	15879.97	28897.82
7	15604.92	44502.74
Tenacidad Total		44502.74

Se observa que, con esta adición en superficie específica, la fibra de acero mejora de gran manera el material en términos de tenacidad, tanto así que incluso después de la falla del concreto el material se sigue deformando y su capacidad de resistir las cargas aumenta, pudiendo destacar que se está presentando un endurecimiento por deformación.

En la tabla de tenacidad acumulada podemos observar como la absorción sigue aumentando conforme aumenta la deformación.

6.1.4 Fibra de Acero AC2-1.0

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual, junto con los índices de tenacidad, se presentan en la Figura 24. Adicionalmente, la Tabla 15 contiene los parámetros obtenidos a partir del ensayo, tales como la tenacidad acumulada aportada por las fibras al concreto y la identificación de los esfuerzos FFF en las posiciones especificadas por la norma EN 14651.

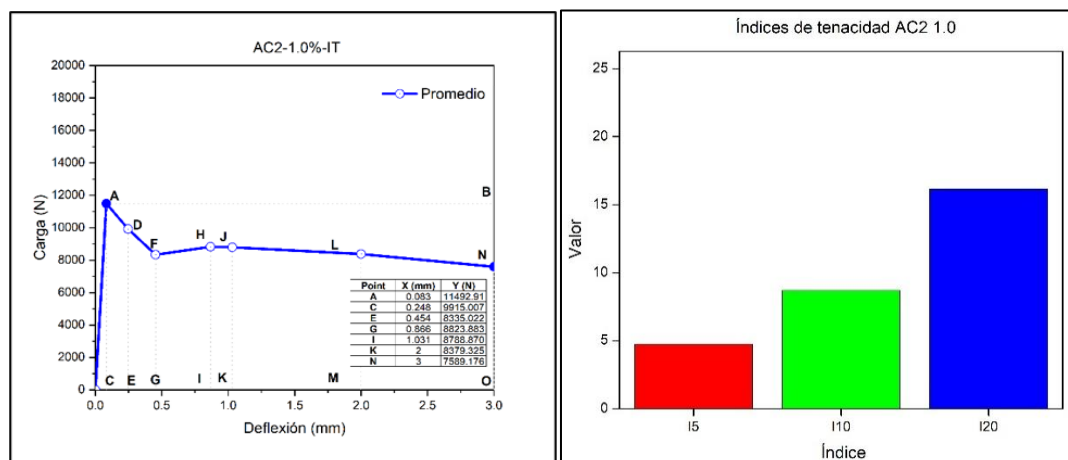


Figura 29: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC2-1.0%

Tabla 15: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.4	3.10	3.18	2.78	2.60
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		3.10		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		4.73		
Índice I10		8.70		
Índice I20		16.16		
R(5,10)		79.40		
R(10,20)		74.65		

Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	474.08	474.08
2	1766.15	2240.23
3	1882.03	4122.26
4	3539.02	7661.28
5	1453.05	9114.33
6	8315.84	17430.17
7	7984.25	25414.42
Tenacidad Total		25414.42

Al agregar esta superficie específica a la mezcla, se puede observar que no es suficiente para que se presente el endurecimiento por deformación como en los casos de 1.5% y 2.0%.

Sin embargo, es notable que el material presenta un comportamiento muy lineal en el rango de 1.0mm a los 3.0mm, lo cual es bueno debido a que el material no pierde tenacidad mientras se sigue deformando, sino que la mantiene.

6.1.5 Fibra de Acero AC2-1.5%

A continuación, en la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión residual, así como los índices de tenacidad correspondientes. Posteriormente, en la Tabla 16 se muestran los datos derivados del ensayo, incluyendo la tenacidad acumulada aportada por la fibra en el concreto y la localización de los esfuerzos F , de acuerdo con lo establecido en la norma EN 14651.

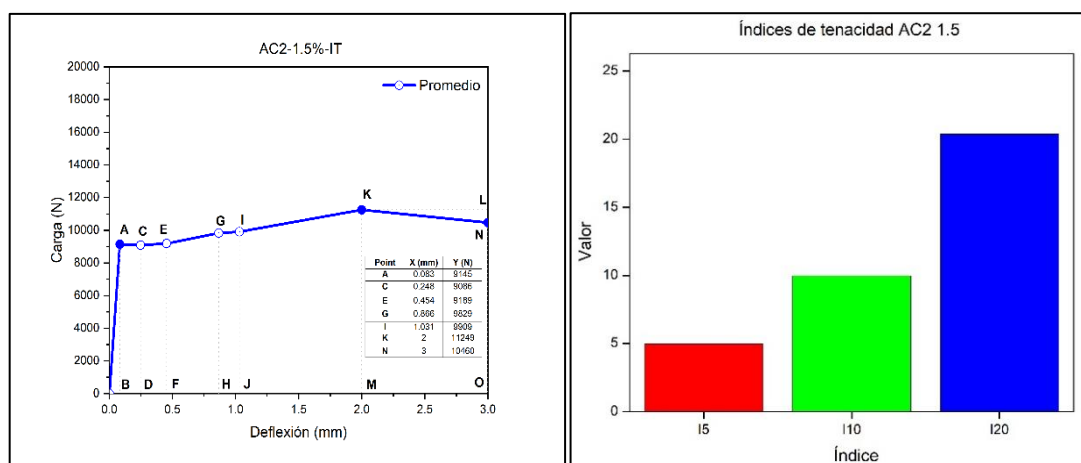


Figura 30: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad acumulada AC2-1.5%

Tabla 16: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.2	3.32	3.3	3.50	3.14
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		3.32		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		4.99		

Índice I10	9.98
Índice I20	20.38
R(5,10)	99.92
R(10,20)	103.98
Tenacidad	
Área bajo la	
Área	curva
	Área acumulada
	(Joules)
1	377.21
2	1504.06
3	1884.61
4	3922.31
5	1628.36
6	10248.32
7	10854.39
Tenacidad Total	30419.26

En caso de este porcentaje de adición, una de las vigas fue descartada debido a que presentaba un comportamiento que difería mucho de las otras dos.

Además, a diferencia de los resultados de la otra fibra de acero con este mismo porcentaje, se observa una notable disminución en la tenacidad del material.

Dado a esto es recomendable hacer un ajuste en los datos obtenidos de esta mezcla en particular.

6.1.6 Fibra de Acero AC2-2.0%

La Figura 31 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual y los índices de tenacidad calculados.

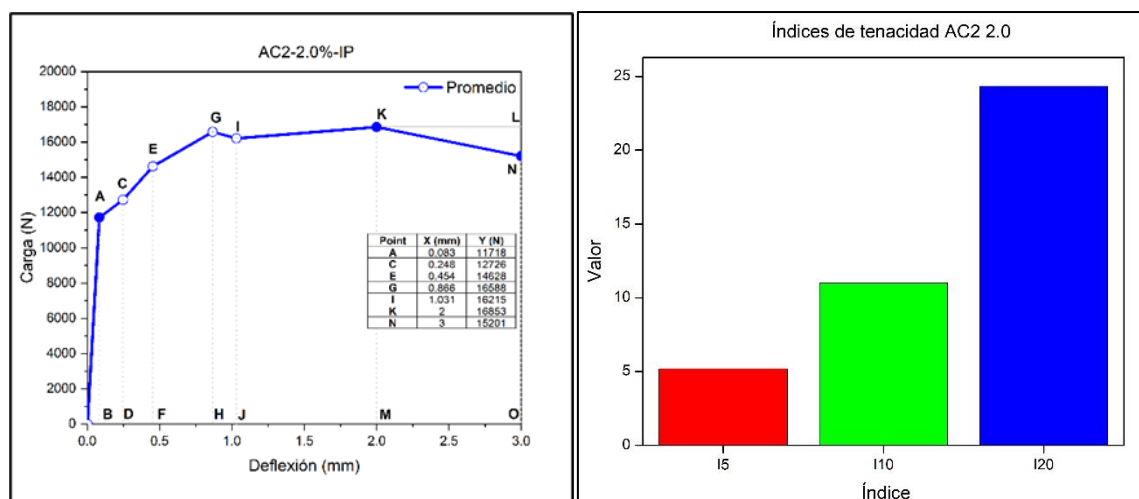


Figura 31: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada AC2-2.0%

De manera complementaria, la Tabla 17 reúne los valores obtenidos durante el ensayo, destacando la tenacidad acumulada proporcionada por las fibras en el concreto y las posiciones de los esfuerzos F definidas por la norma EN 14651.

Tabla 17: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL AC2-2.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
5.8	4.80	5.51	5.23	4.86
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		4.80		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			5.17	
Índice I10			11.01	

Índice I20		24.33
R(5,10)		116.72
R(10,20)		133.20
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	483.35	483.35
2	2016.63	2499.98
3	2820.94	5320.92
4	6438.33	11759.25
5	2706.27	14465.52
6	16017.47	30482.99
7	16027.29	46510.28
Tenacidad Total		46510.28

En caso de esta mezcla de adición, una de las vigas fue descartada debido a que presentaba un comportamiento que difería mucho de las otras dos.

De igual manera que en la mezcla “AC1-2.0%”, se puede observar que se presenta un endurecimiento por deformación en el material, sin embargo, algo notable es que en este caso las fibras empiezan a trabajar un poco antes, se puede notar en el resultado de “F1”, ya que el valor es más alto a diferencia de la mezcla antes mencionada.

6.1.7 Fibra de Alcohol polivinílico EN-1.0

En la Figura 32 se ilustran los resultados correspondientes a la resistencia a la flexión residual y a los índices de tenacidad obtenidos experimentalmente. Asimismo, la Tabla 18 presenta los datos recopilados durante el ensayo, entre los que se incluyen la tenacidad acumulada generada por el refuerzo fibroso y la ubicación de los esfuerzos F conforme a los criterios establecidos en la norma EN 14651.

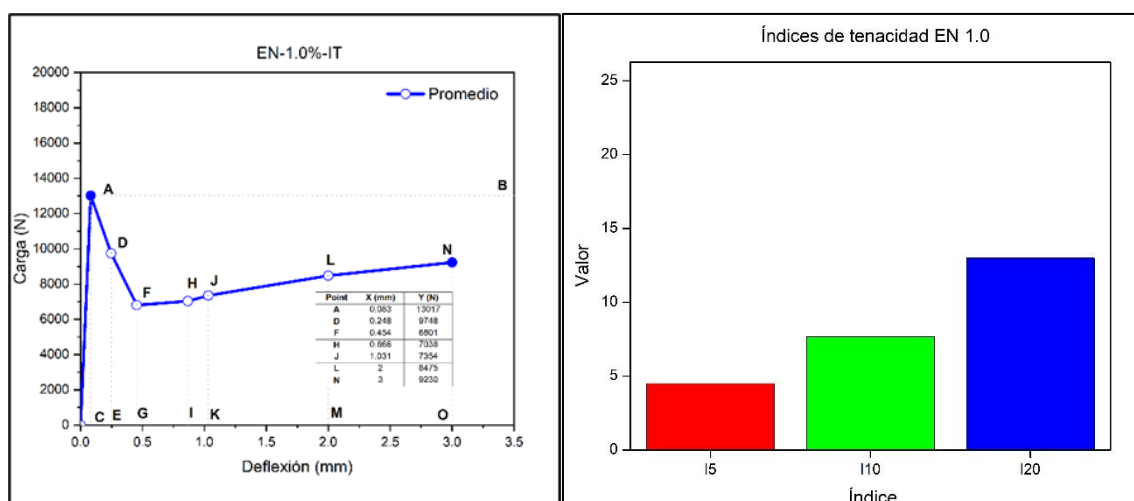


Figura 32: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada EN-1.0%

Tabla 18: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.3	2.07	2.42	2.65	2.85
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.07		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			4.50	

Índice I10		7.68
Índice I20		12.99
R(5,10)		63.57
R(10,20)		53.15
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	536.96	536.96
2	1878.17	2415.13
3	1706.61	4121.74
4	2854.20	6975.94
5	1187.34	8163.28
6	7667.27	15830.55
7	8852.72	24683.27
Tenacidad Total		24683.27

Observando la gráfica, se puede notar como esta fibra sintética en este porcentaje de adición, pese a no superar la carga en la que falla el concreto, mantiene la tenacidad del material después de una deformación de 1.0mm, lo cual indica un buen comportamiento entre la fibra y la matriz.

6.1.8 Fibra de Alcohol polivinílico EN-1.5%

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual, junto con los índices de tenacidad, se presentan en la Figura 33.

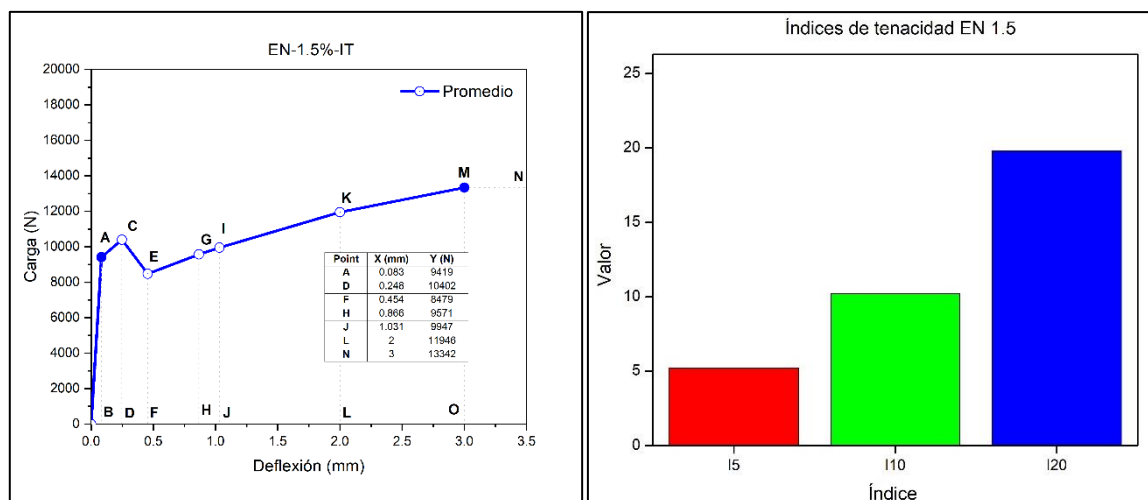


Figura 33: RFR y Tenacidad Acumulada EN-1.5%

Adicionalmente, la Tabla 19 contiene los parámetros obtenidos a partir del ensayo, tales como la tenacidad acumulada aportada por las fibras al concreto y la identificación de los esfuerzos F en las posiciones especificadas por la norma EN 14651.

Tabla 19: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.7	2.79	3.64	4.36	4.42
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.79		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			5.21	
Índice I10			10.22	
Índice I20			19.80	

R(5,10)		100.23
R(10,20)		95.82
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	388.53	388.53
2	1635.24	2023.77
3	1947.11	3970.88
4	3722.85	7693.73
5	1610.29	9304.02
6	10604.30	19908.32
7	12643.91	32552.23
Tenacidad Total		32552.23

Tomando en cuenta con lo visto en el porcentaje anterior, es notable como esta fibra muestra una tendencia en su comportamiento, dado que de igual manera a partir de 1.0mm de deformación, en este caso el material empieza a presentar un ligero endurecimiento por deformación, superando por poco la carga en la que falla el concreto.

6.1.9 Fibra de Alcohol polivinílico EN-2.0%

A continuación, en la Figura 34 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión residual, así como los índices de tenacidad correspondientes.

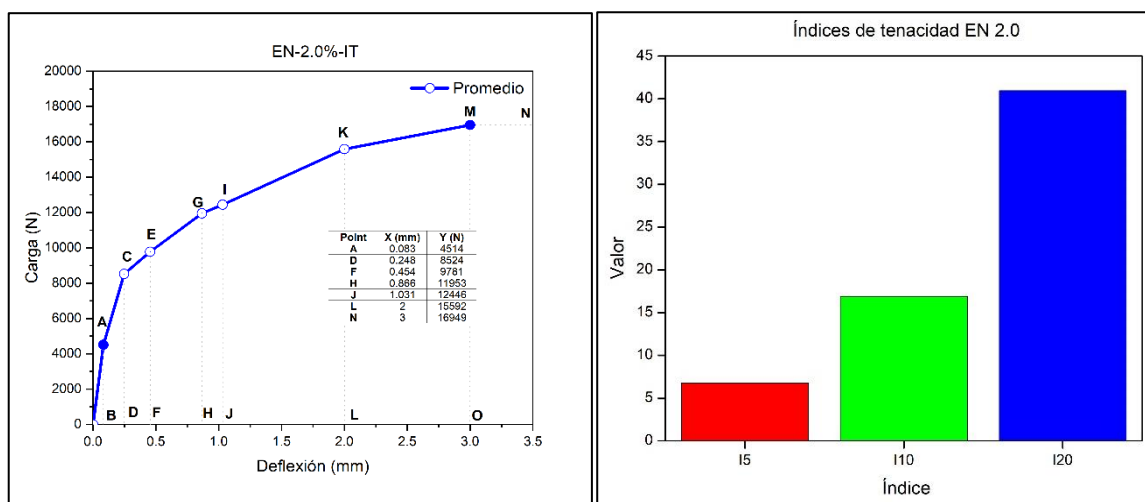


Figura 34: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada EN-2.0%

Posteriormente, en la Tabla 20 se muestran los datos derivados del ensayo, incluyendo la tenacidad acumulada aportada por la fibra en el concreto y la localización de los esfuerzos F, de acuerdo con lo establecido en la norma EN 14651.

Tabla 20: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL EN-2.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
5.2	3.07	3.85	4.76	4.96
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		3.07		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			6.78	
Índice I10			16.91	

Índice I20		40.99
R(5,10)		202.75
R(10,20)		240.73
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	186.21	186.21
2	1075.69	1261.9
3	1887.73	3149.63
4	4482.63	7632.26
5	2012.94	9645.2
6	13581.00	23226.2
7	16270.54	39496.74
Tenacidad Total		39496.74

Observando las gráficas y los valores obtenidos, podemos notar como esta fibra en adición del 2.0% en base de su superficie específica, presenta un comportamiento muy similar a ambas fibras de acero, además que es la que presenta la mayor mejora en términos de tenacidad en comparación con las fibras sintéticas.

Se puede observar un endurecimiento por deformación, comportamiento similar a las fibras de acero presentes en el trabajo.

6.1.10 Fibra de Polipropileno BC-1.0%

La Figura 35 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual y los índices de tenacidad calculados.

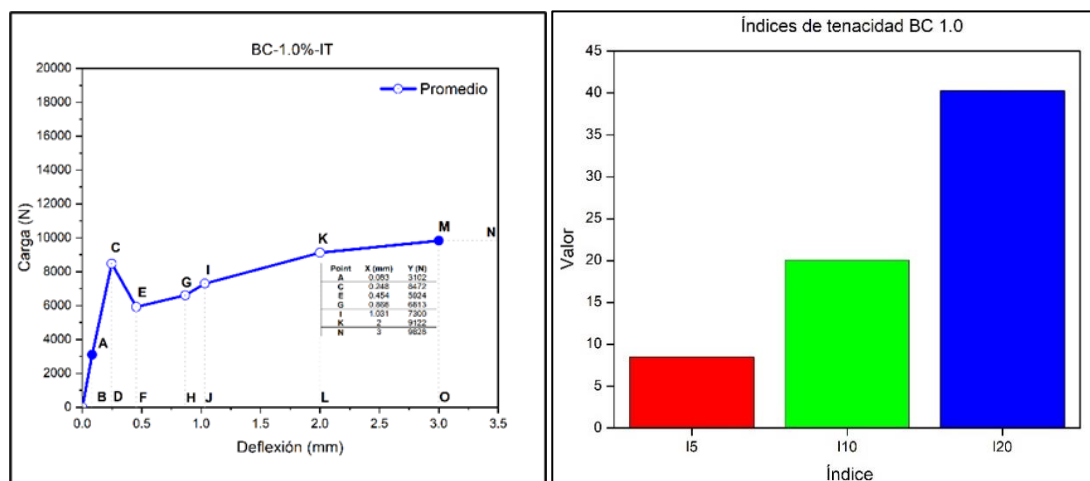


Figura 35: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada BC-1.0%

De manera complementaria, la Tabla 21 reúne los valores obtenidos durante el ensayo, destacando la tenacidad acumulada proporcionada por las fibras en el concreto y las posiciones de los esfuerzos F definidas por la norma EN 14651.

Tabla 21: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL BC-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.1	2.02	2.67	2.84	2.91
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.02		
Índices de tenacidad				
Índices			Valor	
Índice I5			8.46	
Índice I10			20.07	
Índice I20			40.27	

R(5,10)		232.06
R(10,20)		202.08
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	127.95	127.95
2	954.88	1082.83
3	1484.6	2567.43
4	2585.6	5153.03
5	1147.76	6300.79
6	7954.43	14255.22
7	9475.18	23730.4
Tenacidad Total		23730.4

En el caso de esta fibra, fue muy difícil trabajarla debido a su longitud, dado que al incluirla dentro de la mezcla nunca se distribuyó de manera correcta en la matriz, generando “erizos” de fibra, esto para los porcentajes de 1.5% y 2.0%. Esto también se puede observar con las imágenes SEM, la fibra BC es fibrilada, es decir, un filamento este compuesto por filamentos aún más pequeños.

El mismo movimiento del mezclado y la fricción producida entre los filamentos y el concreto puede ocasionar la separación de las fibras en filamentos más pequeños lo que terminaría produciendo estos “erizos” que a su vez provocan la pérdida de trabajabilidad de la mezcla.

6.1.11 Fibra de Alcohol Polivinílico K-1.0%

En la Figura 36 se ilustran los resultados correspondientes a la resistencia a la flexión residual y a los índices de tenacidad obtenidos experimentalmente. Así mismo, la Tabla 22 presenta los datos recopilados durante el ensayo, entre los que se incluyen la tenacidad acumulada generada por el refuerzo fibroso y la ubicación de los esfuerzos F conforme a los criterios establecidos en la norma EN 14651.

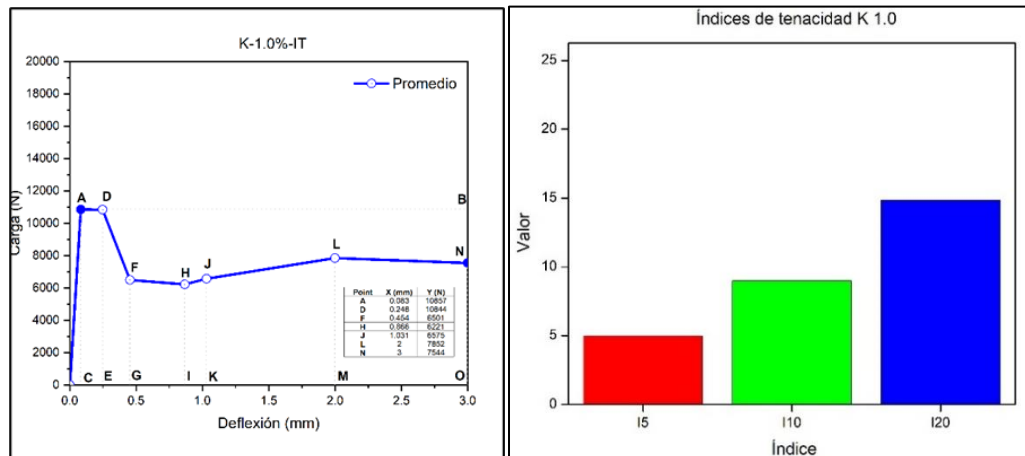


Figura 36: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada K-1.0%

Tabla 22: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.5	2.01	2.25	2.09	1.81
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.01		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		5.00		
Índice I10		8.99		
Índice I20		14.85		
R(5,10)		79.88		
R(10,20)		58.59		
Tenacidad				
Área	Área bajo la curva		Área acumulada	
	(Joules)		(Joules)	
1	447.86		447.86	
2	1790.32		2238.18	
3	1788.68		4026.86	
4	2623.98		6650.84	
5	1055.69		7706.53	
6	6988.26		14694.79	
7	7698.00		22392.79	
Tenacidad Total			22392.79	

Continuando con las fibras sintéticas, analizando el comportamiento del material, se observa que después de la falla del concreto la carga soportada se redujo a poco menos de la mitad cuando las fibras comenzaron a trabajar.

Así mismo es notable como la absorción de energía se reduce después de los 2.0mm, esto responde a la longitud de esta fibra en particular, al ser tan corta, no

permite seguir deformándose debido a que puede fallar la interfase entre la matriz y el filamento por la corta longitud.

6.1.12 Fibra de Alcohol Polivinílico K-1.5%

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual, junto con los índices de tenacidad, se presentan en la Figura 37.

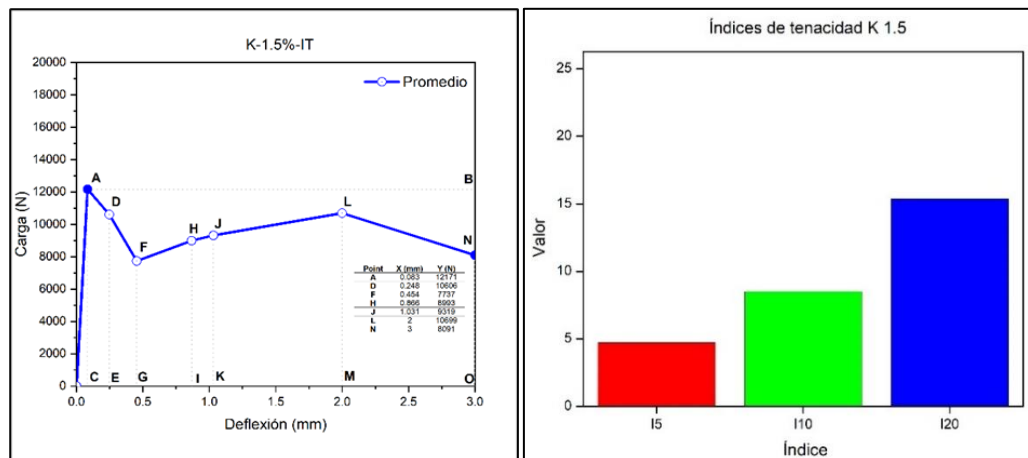


Figura 37: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad acumulada K-1.5%

Adicionalmente, la Tabla 23 contiene los parámetros obtenidos a partir del ensayo, tales como la tenacidad acumulada aportada por las fibras al concreto y la identificación de los esfuerzos F en las posiciones especificadas por la norma EN 14651.

Tabla 23: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.2	2.42	2.99	3.20	2.23
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.42		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		4.95		
Índice I10		9.35		
Índice I20		17.81		
R(5,10)		88.15		
R(10,20)		84.95		
Tenacidad				
Área	Área bajo la curva		Área acumulada	
	(Joules)		(Joules)	
1	424.02		424.02	
2	1673.69		2097.71	
3	1868.83		3966.54	
4	3586.58		7553.12	
5	1551.76		9104.88	
6	9292.30		18397.18	
7	8327.12		26724.3	
Tenacidad Total			26724.3	

De la misma forma que la serie anterior, la fibra “K” después de alcanzar los 2.0mm de deformación presenta la misma reducción en la carga soportada

durante el ensayo, solo que de manera más notoria. Antes de los 2.0mm se presenta un ligero endurecimiento por deformación.

La causa del porque la fibra empieza a dejar de trabajar después de la deformación antes mencionada, además de su corta longitud, se debe también a que es una fibra con una superficie muy lisa, lo que no mejora la adherencia entre la matriz y la fibra.

6.1.13 Fibra de Alcohol polivinílico K-2.0%

A continuación, en la Figura 38 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la flexión residual, así como los índices de tenacidad correspondientes.

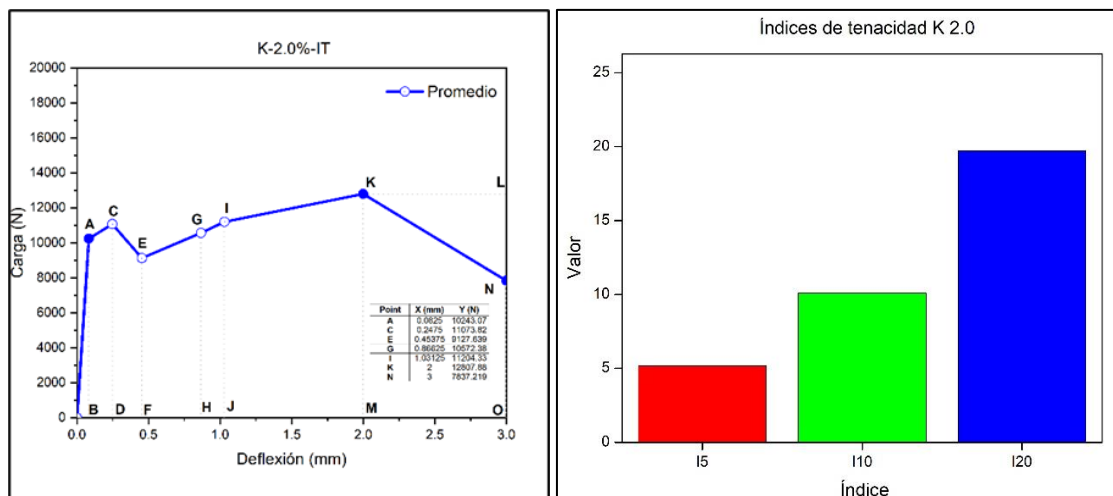


Figura 38: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada K-2.0%

Posteriormente, en la Tabla 24 se muestran los datos derivados del ensayo, incluyendo la tenacidad acumulada aportada por la fibra en el concreto y la localización de los esfuerzos F, de acuerdo con lo establecido en la norma EN 14651.

Tabla 24: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL K-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.5	2.94	3.77	3.57	2.85
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.94		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		
Índice I5		5.18		
Índice I10		10.33		
Índice I20		20.57		
R(5,10)		102.98		
R(10,20)		102.40		
Tenacidad				
Área	Área bajo la curva		Área acumulada	
	(Joules)		(Joules)	
1	390.42		390.42	
2	1633.58		2024	
3	2010.25		4034.25	
4	3997.95		8032.2	
5	1735.13		9767.33	
6	10984.48		20751.81	
7	9693.89		30445.7	
Tenacidad Total			30445.7	

Se puede observar en las gráficas, que la fibra “K” conforme se añade en mayor superficie específica a la mezcla, el aumento de tenacidad es notable en el rango de deformación de los 0.5mm a los 1.5mm, sin embargo, en todos los

porcentajes, se puede observar una caída en el desempeño a partir de los 2.0mm, lo que responde a que esta fibra no puede admitir mayor deformación debido a su corta longitud en comparación con las demás fibras sintéticas.

6.1.14 Fibra de Polipropileno PP-1.0%

La Figura 39 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual y los índices de tenacidad calculados.

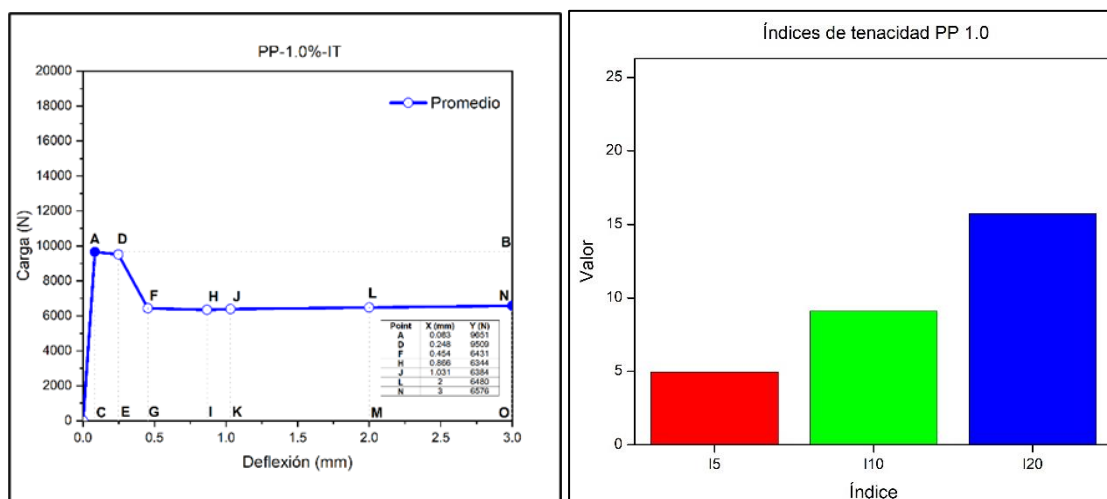


Figura 39: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada PP-1.0%

De manera complementaria, la Tabla 25 reúne los valores obtenidos durante el ensayo, destacando la tenacidad acumulada proporcionada por las fibras en el concreto y las posiciones de los esfuerzos F definidas por la norma EN 14651.

Tabla 25: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-1.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.4	2.11	2.17	2.22	2.14
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.11		
Índices de tenacidad				
Índices		Valor		

Índice I5		4.97
Índice I10		9.10
Índice I20		15.72
R(5,10)		82.58
R(10,20)		66.19
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	398.110	398.11
2	1580.710	1978.82
3	1643.850	3622.67
4	2634.920	6257.59
5	1050.100	7307.69
6	6231.200	13538.89
7	6528.160	20067.05
Tenacidad Total		20067.05

Analizando la fibra “PP”, en este caso a lo largo de las 3 series realizadas, la fibra por presenta un comportamiento muy lineal después de la falla del concreto, es decir, mantiene la misma absorción de energía a lo largo del ensayo, a diferencia de la fibra “K” en este caso no se presenta esa caída en la gráfica después de los 2.0mm, debido a que esta fibra es considerablemente más larga.

6.1.15 Fibra de Polipropileno PP-1.5%

En la Figura 40 se ilustran los resultados correspondientes a la resistencia a la flexión residual y a los índices de tenacidad obtenidos experimentalmente. Asimismo, la Tabla 26 presenta los datos recopilados durante el ensayo, entre los que se incluyen la tenacidad acumulada generada por el refuerzo fibroso y la ubicación de los esfuerzos F conforme a los criterios establecidos en la norma EN 14651.

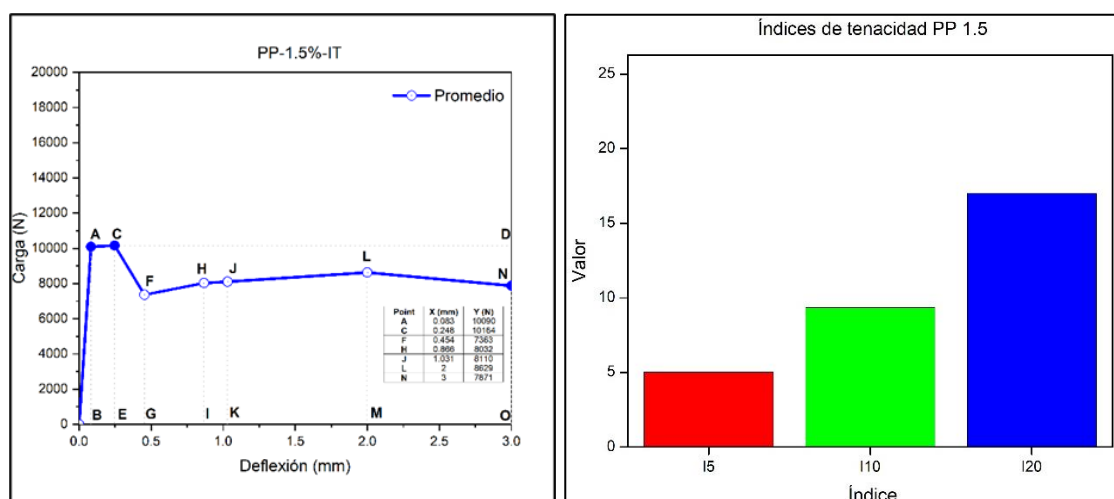


Figura 40: Resistencia a la flexión y Tenacidad Acumulada PP-1.5%

Tabla 26: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-1.5%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.3	2.31	2.7	2.87	2.73
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		2.31		

Índices de tenacidad		
Índices		Valor
Índice I5		5.01
Índice I10		9.36
Índice I20		16.99
R (5,10)		86.85
R (10,20)		76.28
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	416.22	416.22
2	1670.92	2087.14
3	1807.38	3894.52
4	3175.04	7069.56
5	1331.65	8401.2

Siguiendo con el 1.5%, se reitera el comportamiento mencionado en la serie anterior, la fibra mantiene un mismo comportamiento después de la falla del concreto, no se presenta el endurecimiento por deformación de observados en las demás fibras.

Otro punto para notar es que después de la falla del concreto, la carga en la que empiezan a trabajar las fibras es mayor que en la serie anterior.

6.1.16 Fibra de Polipropileno PP-2.0%

Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión residual, junto con los índices de tenacidad, se presentan en la Figura 41.

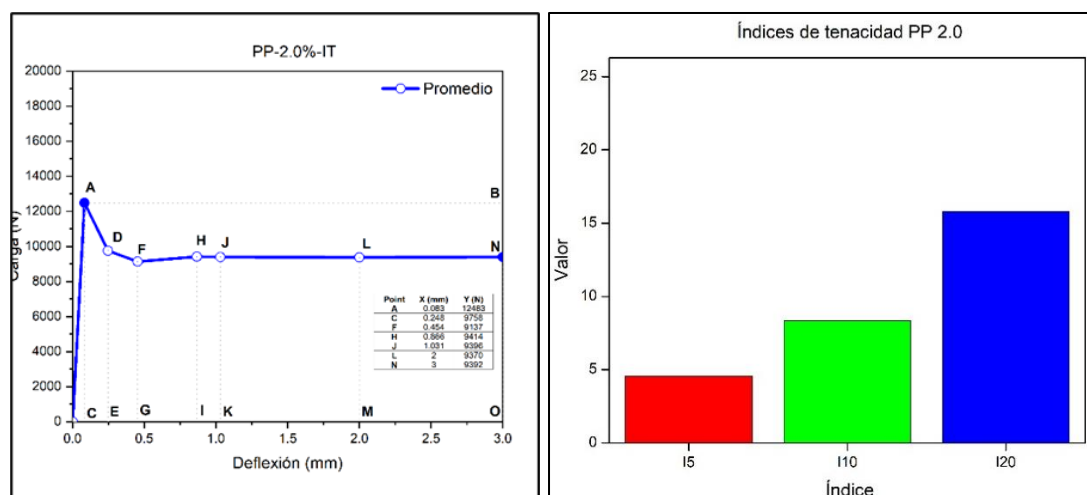


Figura 41: Resistencia a la flexión residual y Tenacidad Acumulada PP-2.0%

Adicionalmente, la Tabla 27 contiene los parámetros obtenidos a partir del ensayo, tales como la tenacidad acumulada aportada por las fibras al concreto y la identificación de los esfuerzos F en las posiciones especificadas por la norma EN 14651.

Tabla 27: Cálculo Índice de Tenacidad y TPL PP-2.0%

Estados F (MPa)				
FL	F1	F2	F3	F4
4.6	3.02	2.85	2.97	2.91
Criterios TPL				
47 % (4 MPa)	<	F1		
1.88%		3.02		

Índices de tenacidad		
Índices		Valor
Índice I5		4.56
Índice I10		8.35
Índice I20		15.78
I30*		18.79
R(5,10)		75.68
R(10,20)		74.30
Tenacidad		
Área	Área bajo la curva	Área acumulada
	(Joules)	(Joules)
1	514.94	514.94
2	1834.92	2349.86
3	1948.53	4298.39
4	3826.11	8124.5
5	1551.80	9676.3
6	9089.52	18765.82
7	9381.06	28146.88
Tenacidad Total		28146.88

Finalmente, en la serie de 2.0% las fibras presentan el mismo comportamiento que en las dos series anteriores, la carga en la que empiezan a trabajar las fibras también es mayor y a lo largo de todo el ensayo la absorción de energía se mantiene constante.

6.2 ANALISIS DE LA RESISTENCIA A LA FLEXION POR TIPOS DE FIBRA

A continuación, se presenta un análisis por separado de cada uno de los tipos de fibra utilizados en este trabajo de investigación, siendo un análisis para las fibras de acero, uno para las fibras de polipropileno y otro para las fibras de polivinilo.

Empezando por las fibras de acero podemos agrupar el resultado de las pruebas a flexión que se presentan en la figura 42.

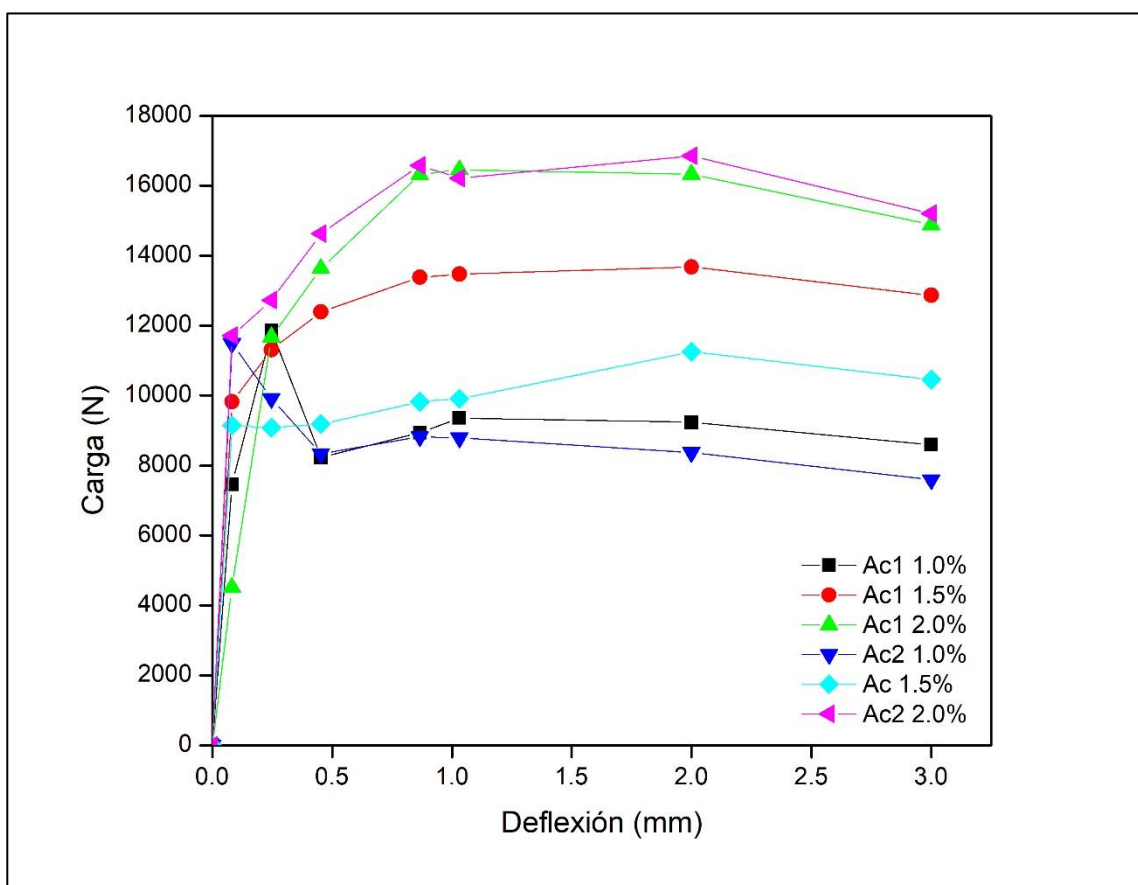


Figura 42: Resistencia a la flexión en concreto con fibras de acero

Los resultados experimentales permiten concluir que el incremento del contenido de fibras de acero mejora significativamente la respuesta mecánica del concreto reforzado sometido a flexión. La mezcla Ac2 2.0% presentó el mejor desempeño global, alcanzando la mayor resistencia máxima, mayor estabilidad post-agrietamiento y mayor capacidad de absorción de energía.

Asimismo, se comprobó que la incorporación de fibras incrementa la tenacidad del concreto, favoreciendo un comportamiento más dúctil y menos frágil. Las mezclas con mayores porcentajes de fibras mantuvieron cargas residuales elevadas incluso para grandes deflexiones, lo que demuestra que el refuerzo de fibras de acero en conjunto con un elemento de concreto puede presentar un endurecimiento por deformación, es decir, mientras mayor sea la deflexión mayor es el esfuerzo soportado por el elemento hasta cierto punto, evidenciando una mejora importante en la capacidad de disipación de energía y control de grietas.

En términos estructurales, el uso de fibras de acero representa una alternativa efectiva para mejorar el comportamiento del concreto frente a esfuerzos de flexión, especialmente en elementos sometidos a cargas dinámicas o condiciones donde se requiere elevada ductilidad y resistencia post-agrietamiento.

Seguido a esto se procede con el análisis de las fibras de polipropileno, los resultados se presentan en la figura 43.

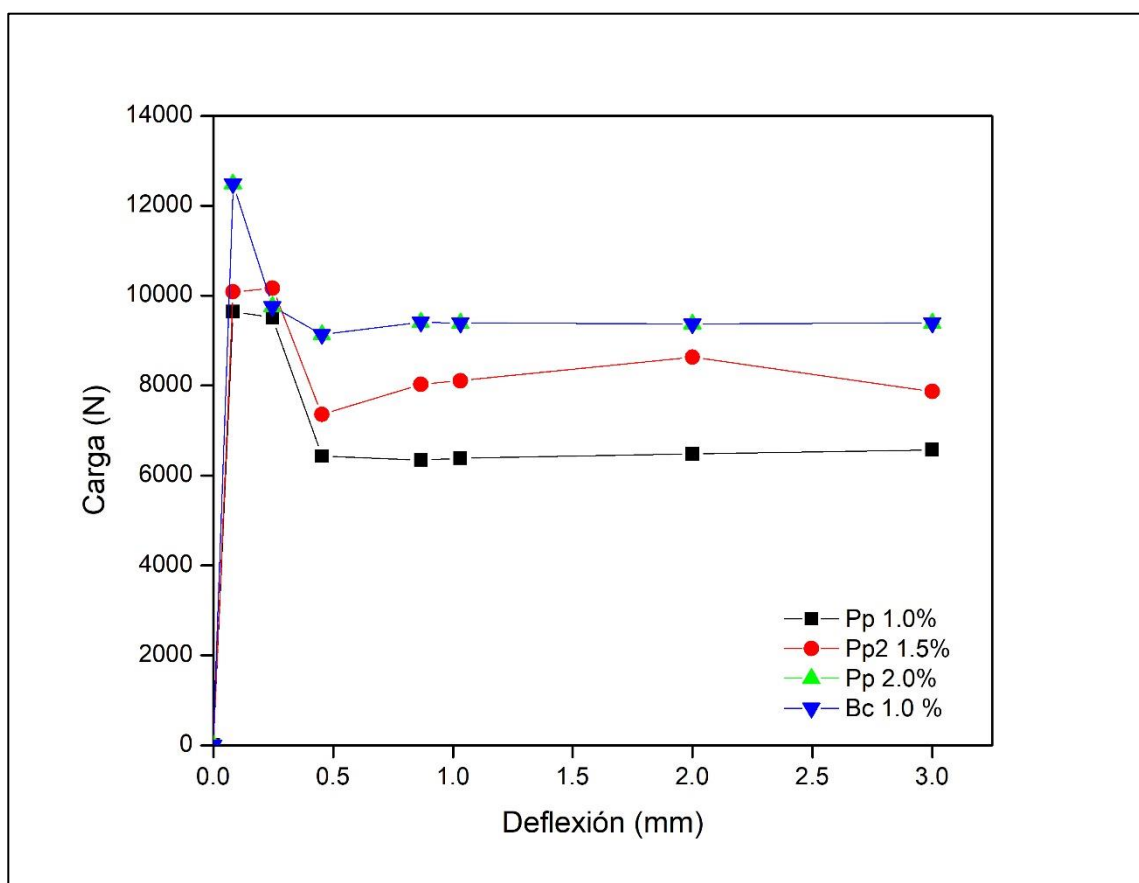


Figura 43: Resistencia a la flexión en concreto con fibras de polipropileno.

La Figura 43 presenta las curvas carga-deflexión correspondientes a mezclas de concreto reforzado con fibras de polipropileno sometidas a ensayo de flexión. El comportamiento observado permite evaluar la influencia del contenido de fibras sobre la resistencia máxima, ductilidad, tenacidad y capacidad de absorción de energía del material.

En términos generales, las fibras de polipropileno contribuyen al control de fisuración y mejoran el comportamiento post-agrietamiento del concreto. Sin embargo, debido a su menor módulo de elasticidad y resistencia mecánica en comparación con las fibras de acero, la capacidad de transferencia de esfuerzos y absorción de energía es más limitada. Aun así, se observa que el incremento

en el porcentaje de fibras favorece una respuesta más estable y menos frágil frente a la flexión.

La tenacidad del material se encuentra asociada al área bajo la curva carga-deflexión, la cual representa la energía absorbida durante el proceso de deformación hasta la falla.

Los resultados experimentales demuestran que la incorporación de fibras de polipropileno mejora el comportamiento del concreto sometido a flexión, especialmente en la etapa posterior al agrietamiento.

La mezcla Pp 2.0% presentó el mejor desempeño global, alcanzando la mayor estabilidad estructural y la mayor capacidad de absorción de energía, evidenciando un comportamiento más dúctil y menos frágil.

Asimismo, se comprobó que el aumento del contenido de fibras incrementa la resistencia residual y mejora el control de fisuración, permitiendo mantener capacidad resistente durante mayores deformaciones.

Finalmente, en la figura 44 se presentan los resultados de la resistencia a la flexión de las fibras de alcohol polivinílico.

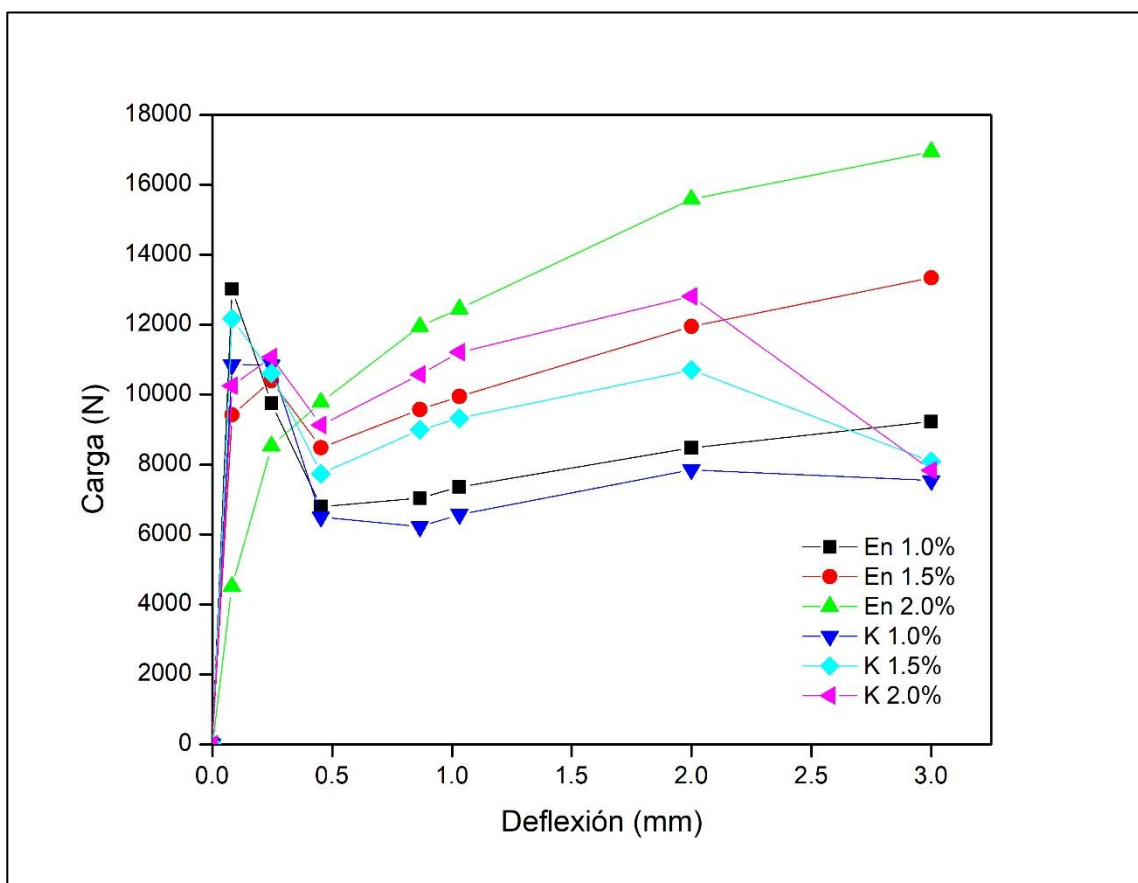


Figura 44: Resistencia a la flexión en concreto con fibras de polivinilo de alcohol.

La Figura 44 presenta las curvas carga-deflexión correspondientes a mezclas de concreto reforzado con fibras de polivinilo sometidas a ensayo de flexión. El comportamiento de las curvas permite evaluar la influencia del contenido de fibras sobre la resistencia máxima, ductilidad, capacidad post-agrietamiento y absorción de energía del concreto.

La tenacidad del material está representada por el área bajo la curva carga-deflexión, la cual corresponde a la energía absorbida durante el proceso de deformación hasta la falla. Las mezclas que mantienen cargas elevadas para mayores niveles de deflexión presentan una mayor capacidad de disipación energética y un comportamiento más dúctil.

De manera general, los resultados muestran que el incremento en el contenido de fibras de polivinilo mejora significativamente el comportamiento post-agrietamiento del concreto, incrementando tanto la resistencia residual como la capacidad de absorción de energía. Asimismo, algunas mezclas presentan una respuesta progresiva y estable después del agrietamiento inicial, evidenciando una eficiente interacción fibra-matriz

Los resultados experimentales demuestran que la incorporación de fibras de polivinilo mejora significativamente el comportamiento post-agrietamiento del concreto sometido a flexión. A medida que aumenta el contenido de fibras, se observa:

- Incremento de la resistencia residual.
- Mayor estabilidad de las curvas carga-deflexión.
- Mejora de la ductilidad.
- Aumento de la capacidad de absorción de energía.
- Reducción del comportamiento frágil.

Las fibras de polivinilo actúan como mecanismos de puenteo entre grietas, permitiendo mantener la transferencia de esfuerzos incluso después de la falla inicial del concreto.

Las mezclas con mayores porcentajes de fibras presentan curvas más amplias y estables, indicando una mayor tenacidad. Particularmente, la serie En 2.0% muestra el comportamiento más favorable debido a su capacidad de incrementar la carga conforme aumenta la deflexión, lo que evidencia una eficiente interacción entre fibras y matriz de concreto.

En contraste, las mezclas con menores porcentajes de fibras presentan descensos bruscos posteriores al primer pico de carga, reflejando una menor eficiencia en el control de fisuración y un comportamiento relativamente más frágil

6.3 ABOSRCIÓN DE ENERGIA VS SUPERFICIE ESPECIFICA

En la figura 45 se encuentra el desarrollo de la herramienta gráfica que permitirá correlacionar la absorción de energía del material con la superficie específica adicionada a la matriz de concreto, la cual permitirá una mejor selección de una fibra de acuerdo con una tenacidad objetivo.

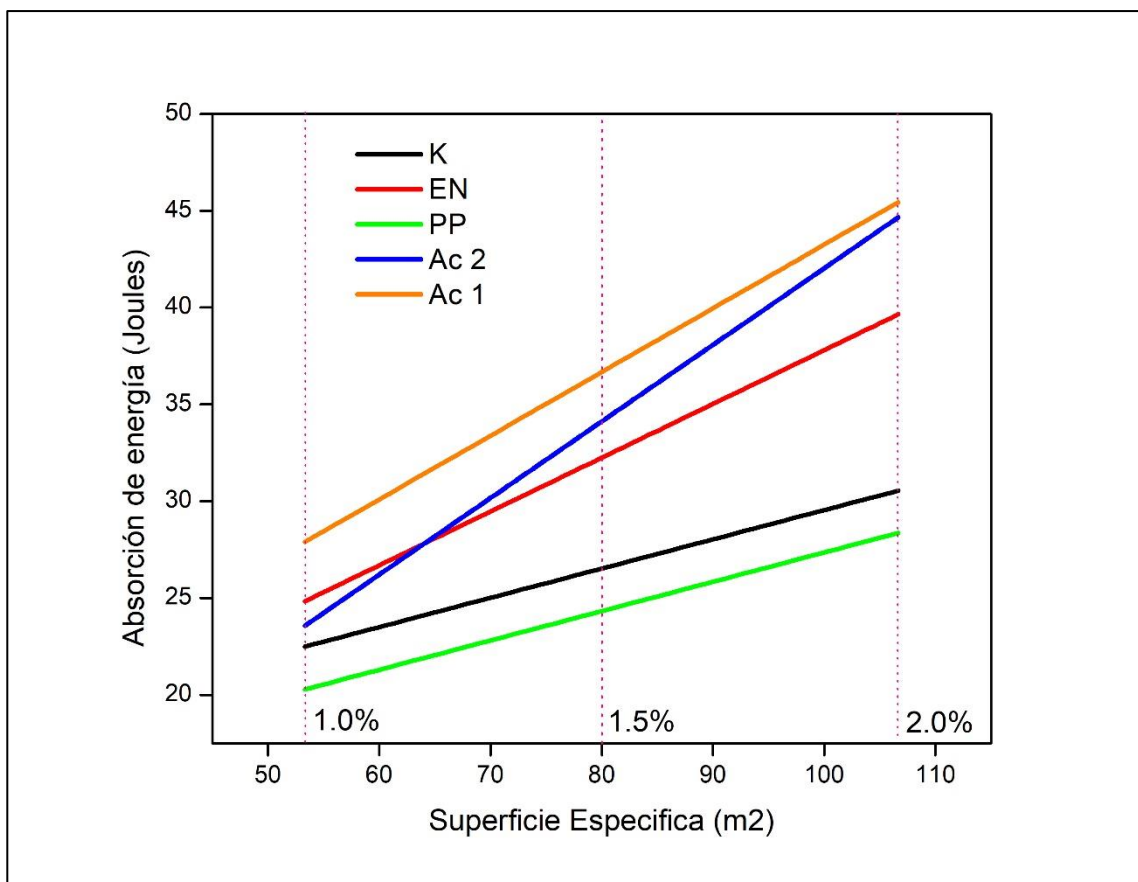


Figura 45: Gráfica para selección de fibra de acuerdo a su tenacidad.

Analizando la gráfica, las fibras que presentan el mayor aumento de absorción de energía son las fibras de acero, debido a que conforme se aumenta la superficie específica cubierta dentro de la matriz el comportamiento de endurecimiento por deformación es mucho más notorio, además que pese al haber finalizado el ensayo entorno a los 3.0mm de deformación, el

comportamiento indica que incluso después de esto las fibras pueden seguir trabajando.

La fibra “EN” fue la que presento el mejor comportamiento de las fibras sintéticas, así mismo de estas fibras fue la que demostró tener un endurecimiento por deformación muy notable, siendo en la serie en la que mejor se observa esto la serie de 2.0%. Esto también puede responder debido a la forma de la fibra, la cual es corrugada. Esto mejora el cómo se adhiere la fibra a la matriz de concreto.

Respecto a las fibras “K” y “PP”, el comportamiento es muy similar, como se observó en los ensayos de cada una de las series, las fibras trabajan de manera lineal una vez que empiezan a trabajar, es decir, se mantiene la absorción de energía a lo largo del ensayo. Sin embargo, en el caso de la fibra “K” se presenta una caída de la propiedad antes mencionada una vez pasando una deformación de 2.0mm. La razón de esto es a que la fibra es muy corta en comparación de las demás fibras sintéticas, teniendo una longitud similar a las fibras de acero. Por lo que una vez se alcanza la deformación antes mencionada, lo que falla es la interfase entre la fibra y la matriz de concreto. Cabe mencionar que la forma de esta fibra es completamente cilíndrica además de que tiene una superficie bastante lisa, lo cual no mejora la adherencia de la fibra al concreto.

Se puede observar una diferencia clara entre las fibras sintéticas y las fibras de acero, esto responde debido al módulo de elasticidad de cada uno de los materiales. Siendo una de las finalidades de este trabajo fomentar el uso de las fibras sintéticas, pese que, al desempeño observado en las gráficas, se puede concluir en que cada proyecto tiene diferentes solicitudes como lo sería un grado de tenacidad requerido, por lo que no siempre será necesario recurrir al uso de las fibras de acero para satisfacer esta tenacidad.

Esta herramienta visual permitirá en base a un grado de tenacidad solicitado realizar una selección de fibra más acertada, permitiendo a su vez elegir la superficie específica necesaria que se puede trasladar a un volumen exacto de sustitución en una mezcla de concreto, logrando alcanzar la tenacidad requerida por el proyecto.

7.- CONCLUSIONES

Objetivo 1

- Los resultados de la curva de desarrollo de resistencia del concreto demuestran que después de los 28 días, se observa un aumento del 11.0% de la resistencia a la compresión, lo que entra en un valor aceptable para el equipo de trabajo, por lo que permitiría poder ensayar las vigas a una edad de 56 días. De esta manera los resultados de absorción de energía que se obtengan no estarán afectados por una mejora de la resistencia propia del concreto.
- Al observar los resultados de resistencia a la compresión, se pueden observar dos tendencias, mientras más se adicionen fibras de acero, el concreto empieza a perder resistencia, en caso contrario con las fibras sintéticas que al adicionar más fibras el concreto empieza a ganar resistencia. Esto se puede asociar al acomodo de las fibras dentro del molde cilíndrico. Las fibras sintéticas al ser flexibles pueden acomodarse de una mejor manera dentro del cilindro de concreto, mientras que las fibras de acero son más rígidas y estas pueden desplazar de cierta manera el agregado grueso dentro del concreto y alterar el correcto acomodo del material.
- Se observa que el uso del polvo de caliza como un “filler” en la matriz de concreto, permitió alcanzar resistencias a la compresión altas respecto al consumo de cemento en el proporcionamiento de la mezcla. Pese que aún no se realiza una prueba para verificar el contenido de vacíos en la matriz, los resultados podrían indicar que tanto el uso como del polvo de caliza y el agregado grueso de 3/8” están densificando la matriz correctamente.

Objetivo 2

- Se observó que la fibra con el mejor comportamiento en términos de tenacidad es la fibra de acero AC2, añadiendo una superficie específica

de fibra de 106,000.0 m² fue donde se presenta la máxima tenacidad del concreto. Además, se observa que después de la falla del concreto las fibras empiezan a resistir el esfuerzo de tensión, este esfuerzo aumenta conforme la deflexión va aumentando, a este comportamiento se le define endurecimiento por deformación.

- El comportamiento de endurecimiento por deformación es más común en las fibras de acero debido a su alto módulo de elasticidad. Se pudo observar que en cuanto las fibras dejan de resistir el esfuerzo de flexión se debe a que se pierde la adherencia entre el filamento y la matriz, es decir, se produce un arrancamiento de las fibras (Pull out).

Objetivo 3

- Al desarrollar la herramienta gráfica, se pudieron definir líneas de tendencia que permitirán la selección de una fibra específica para cada caso en particular, es decir, al tener un proyecto con una resistencia solicitada, al usar la herramienta gráfica se podrá seleccionar la fibra que cumpla con ese requisito.
- Así mismo, aunque se estén usando fibras comerciales específicas, se podrán buscar alternativas similares que cumplan con la misma relación aspecto y que sean de un mismo material, sabiendo que podrían presentar un comportamiento mecánico similar en el concreto.

8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *ACI 544.3R-08-Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete.*
- [2] S. Dejian, L. Ci, L. Yueyao, and S. Haoze, "Early-age autogenous shrinkage, tensile creep, and restrained cracking behavior of ultra-high-performance concrete incorporating polypropylene fibers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 138, Apr. 2023.
- [3] Z. Deng, F. Shi, S. Yin, and R. Tuladhar, "Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test," *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 229–235, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.134.
- [4] R. F. Zollo, "Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development," 1997.
- [5] C. Lin, T. Kanstad, S. Jacobsen, and G. Ji, "Bonding property between fiber and cementitious matrix: A critical review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 378, p. 131169, May 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131169.
- [6] R. Rostami, M. Zarrebini, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, S. M. Abtahi, and H. Fashandi, "The effect of specific surface area of macro fibers on energy absorption capacity of concrete," *Journal of the Textile Institute*, vol. 110, no. 5, pp. 707–714, May 2019, doi: 10.1080/00405000.2018.1512040.
- [7] S. A. Carmona Malatesta and C. Molins, "Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona," *Universitat Politècnica de Valencia*, Mar. 2018. doi: 10.4995/hac2018.2018.5668.
- [8] Á. de la Rosa, E. Poveda, G. Ruiz, and H. Cifuentes, "Proportioning of self-compacting steel-fiber reinforced concrete mixes based on target plastic viscosity and compressive strength: Mix-design procedure & experimental validation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 409–419, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.006.
- [9] A. E. Naaman, "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites," *Journal of Advanced Concrete Technology*, pp. 241–252, 2003.
- [10] by Roland Heere and D. R. Morgan, "Specification of Shotcrete Toughness."
- [11] M. R. Latifi, Ö. Biricik, and A. Mardani Aghabaglou, "Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 345–369, Feb. 2022, doi: 10.1080/01694243.2021.1922221.
- [12] J. Ahmad, D. D. Burduhos-Nergis, M. M. Arbili, S. M. Alogla, A. Majdi, and A. F. Deifalla, "A Review on Failure Modes and Cracking Behaviors of Polypropylene Fibers Reinforced Concrete," *Buildings*, vol. 12, no. 11, p. 1951, Nov. 2022, doi: 10.3390/buildings12111951.
- [13] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 40, pp. 114–140, May 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.

- [14] E. John and B. Lothenbach, "Cement hydration mechanisms through time – a review," *J. Mater. Sci.*, vol. 58, no. 24, pp. 9805–9833, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10853-023-08651-9.
- [15] C. Gaedicke, A. Torres, K. C. T. Huynh, and A. Marines, "A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 271–278, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.031.
- [16] M. Rabi, K. A. Cashell, and R. Shamass, "Flexural analysis and design of stainless steel reinforced concrete beams," *Eng. Struct.*, vol. 198, p. 109432, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109432.
- [17] Z. F. Akbulut, T. A. Tawfik, P. Smarzewski, and S. Guler, "Advancing Hybrid Fiber-Reinforced Concrete: Performance, Crack Resistance Mechanism, and Future Innovations," *Buildings*, vol. 15, no. 8, p. 1247, Apr. 2025, doi: 10.3390/buildings15081247.
- [18] G. Wang, Y. Zhuang, L. Song, Z. He, J. Zhang, and H. Zhou, "Mechanical properties and failure mechanism of fiber-reinforced concrete materials: Effects of fiber type and content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 465, p. 140190, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140190.
- [19] J. R. Pereira, J. B. L. P. e Silva, L. A. Gachet, A. C. dos Santos, and R. C. C. Lintz, "Evaluation of the Addition of Polypropylene (PP) Fibers in Self-compacting Concrete (SCC) to Control Cracking and Plastic Shrinkage Between Different Methods," *Materials Research*, vol. 26, no. suppl 1, 2023, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2022-0567.
- [20] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez, and A. Picazo, "Recent advances in structural fibre-reinforced concrete focused on polyolefin-based macro-synthetic fibres," *Materiales de Construcción*, vol. 70, no. 337, p. e206, Mar. 2020, doi: 10.3989/mc.2020.12418.
- [21] J. Yang, Y. Zhang, and J. Huang, "The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 19, Jan. 2024, doi: 10.1177/15589250241239242.
- [22] A. A. Del Savio, D. La Torre Esquivel, and J. M. García Landeo, "Post-Cracking Properties of Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers through the Barcelona Test," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 18, p. 3718, Sep. 2023, doi: 10.3390/polym15183718.
- [23] J.-H. Lee, "Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete," *Compos. Struct.*, vol. 168, pp. 216–225, May 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.01.052.
- [24] ASTM C 39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *American society for Testings and Materials*, 2023.
- [25] ASTM C 31, "Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field," Nov. 15, 2015, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/C0031_C0031M-15A.
- [26] A. M. Neville, "Properties of Concrete," *Pearson Education Limited*, 2011.
- [27] M. A. Mujalli, S. Dirar, E. Mushtaha, A. Hussien, and A. Maksoud, "Evaluation of the Tensile Characteristics and Bond Behaviour of Steel Fibre-Reinforced Concrete: An Overview," *Fibers*, vol. 10, no. 12, p. 104, Dec. 2022, doi: 10.3390/fib10120104.

- [28] T. Abu-Lebdeh, S. Hamoush, W. Heard, and B. Zornig, "Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 39–46, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.059.
- [29] "EN 14651 Flexion en concreto fibroreforzado".
- [30] I. Ferdosian and A. Camões, "Mechanical performance and post-cracking behavior of self-compacting steel-fiber reinforced eco-efficient ultra-high performance concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 121, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104050.