



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON REFUERZO DE FIBRA DE PVA LARGAS Y CORTAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ANDRÉS IGNACIO PERALTA RETAMAL

PROFESOR GUÍA:
FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
CARLOS SEPÚLVEDA SORUCO

Este trabajo ha sido financiado por el
proyecto: FONDECYT REGULAR N°
1200709

SANTIAGO DE CHILE
2022

ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CON REFUERZO DE FIBRA DE PVA LARGAS Y CORTAS

En la actualidad, el hormigón es el material de construcción más usado dado a sus altas cualidades para resistir cargas de compresión y su alta durabilidad frente a condiciones adversas. Junto con el acero, se crea el hormigón armado resolviendo la deficiencia del hormigón a acciones que someten este material a tracción. Las aplicaciones de la fibra como refuerzo en el hormigón son bajas, tales fines se reducen principalmente a revestimientos, sin poder ser aplicados a elementos estructurales. Para que el FRC (Fiber Reinforced Concrete) logre su aplicación en elementos de uso estructural se es necesario una serie de estudios que avalen su capacidad y respuesta frente a diversas cargas. Actualmente existen estudios que dan como uso la fibra de Alcohol polivinílico (PVA) como refuerzo para mejorar la resistencia del hormigón junto con su ductilidad, tales estudios abarcan lo que respecta a una fibra de PVA de largo 12 a 15 [mm] en dosificaciones de hormigón con árido fino y grueso, mostrando un claro comportamiento dúctil y un aumento en la resistencia a tracción principalmente con finos. Dada a la fehaciente necesidad de buscar una mejora en el comportamiento obtenido anteriormente con árido grueso, se estudia el uso de mezclar fibra de PVA corta de 12 [mm] en un 30% junto con fibra de PVA larga de 30 [mm] en un 70% en dos tipos de mezclas, tomando M1 la mezcla que incluye árido grueso con un tamaño máximo de este de 19 [mm] y M2 la mezcla de árido fino que toma un tamaño máximo de este de 4.75 [mm], junto con esto se consideran 3 tipos de volúmenes diferentes de fibra para cada uno, de 0%, 1.23% y 2%. Se realizan los siguientes ensayos; tracción directa, compresión y flexión, para los dos primeros ensayos se consideran 36 probetas cilíndricas de 105 [mm] de diámetro y 210 [mm] de alto, y para el tercer ensayo se consideran 12 viguetas de 150 [mm] de alto, 150 [mm] de ancho y un largo de 530 [mm]. En tracción directa se presenta un aumento de la resistencia máxima junto con el comportamiento dúctil esperado, los cuales son directamente proporcional al aumento del refuerzo de fibra en la probeta, los valores en tensiones máximas son similares entre mezclas con 2% de fibra, M1-2% 2.55 [MPa] y M2-2% 2.65 [Mpa], por otro lado, las deformaciones últimas obtenidas corresponden a M1-2% 1.5 [mm] y M2-2% 1.84 [mm]. Para el ensayo a compresión la resistencia máxima optima se obtiene en M1-2% y M2-1.23% con 41.84 [MPa] y 37.67[MPa] respectivamente, con respecto al comportamiento dúctil, este presenta una mejor respuesta en cada mezcla para M1-1.23% y M2-2%, con valores de deformaciones últimas de 2.17 [mm] y 1.95 [mm]. Por último, para los ensayos a flexión, tanto la resistencia máxima como la respuesta dúctil aumentan proporcionalmente a la cantidad de fibra de refuerzo que se utilice, obteniendo valores óptimos de tensión máxima de cada mezcla de M1-2% 4.89 [MPa] y M2-2% 4.39 [MPa], por otro lado, los óptimos en deformaciones últimas corresponden a los mismos especímenes con valores de 3.79 [mm] y 5.11 [mm]. Finalmente, se logra una respuesta similar de ambas mezclas esto debido al uso dentro de fibras largas y cortas, es decir, tanto la ductilidad como la resistencia máxima, en ambos casos, presentan mejoras obteniendo valores similares en estos puntos.

*En agradecimiento a esas personas especiales que siempre me han apoyado y creído en mí,
gracias a ustedes por ayudarme a estar aquí.*

Agradecimientos

De corazón, comienzo agradeciendo a mis padres, Andrés Peralta y Eddy Retamal, quienes me apoyaron incondicionalmente a pesar de mis falencias, quienes me enseñaron que el amor y respeto va de la mano con el trabajo y el esfuerzo, realmente agradezco de que nunca dejaran de creer en mí, a mi pareja Carla Muñoz a la cual estaré eternamente agradecido por su decisión de empezar a caminar junto a mí, siendo un apoyo en estos últimos años universitarios, dándome amor y compañía, alentándome a seguir y motivándome día a día, gracias por enseñarme el valor del amor y responsabilidad. También quiero agradecer a mi hermano Matías Peralta por siempre distraerme y apoyarme a su manera, gracias por ser un gran hermano y a Karina Retamal, mi tía, más bien mi hermana, quien siempre creyó en mí y me ayudó en lo que necesitara. Realmente gracias a ustedes, mi círculo más cercano, por ese apoyo incondicional que me dieron, no lo hubiera logrado sin ustedes, los amo con todo mi corazón.

Quiero agradecer a Santiago y Marcela por su increíble apoyo constante a lo largo de este proceso de titulación, sin su ayuda hubiera sido mucho más difícil, el trabajo en equipo es un proceso de altos y bajos, dejando aprendizajes más allá de lo teórico.

Agradezco enormemente a mi profesor guía Fabián Rojas y a mi profesor co-guía Leonardo Massone por la ayuda, los feedbacks y los buenos momentos que se mantuvieron casi semanalmente en las reuniones. A Jonathan por su constante ayuda a lo largo de este proceso de trabajo. Agradecer al profesor Pedro Soto, quien estuvo de un comienzo apoyando en los ensayos y en cada problema que se presentaba, con paciencia y tranquilidad. A Omar y Mario quienes nos dieron indicaciones y facilitaron el espacio para hacer la mezcla de hormigón. Agradezco a mis amigos de calerapark quienes me escucharon y dieron su apoyo en este proceso, a los miedos quienes siempre tuvieron buenos momentos a lo largo de este proceso universitario, ludópatas quienes fueron los primeros compañeros en la universidad.

Quiero dedicar unas palabras a mis abuelos, Domingo Retamal y Andrés Peralta, quienes ya no están en este mundo terrenal, pero me enseñaron el valor de la humildad y la importancia de la familia, a mis abuelas que aún me acompañan, Graciela Ramírez y Hortensia Ramírez, por siempre estar ahí para mí, a mi familia Peralta y a mi familia Retamal, a todos agradezco por todo el apoyo a lo largo de este proceso universitario.

Por último, agradecer a cada uno de mis perritos, mis niñas Gala, Laura, Reiko, Sol y Titi junto también con Noa, Cielo, Duma y Aquiles, son mi compañía, felicidad y amor incondicional.

MUCHAS GRACIAS.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GENERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	MARCO TEÓRICO	3
3.1	LITERATURA	3
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	4
3.3	HORMIGÓN CON FIBRA (FRC)	5
3.4	HORMIGÓN CON FIBRA PVA	7
3.5	COMPORTAMIENTO DEL FRC CON FIBRAS DE PVA	9
3.6	INFLUENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO DE ÁRIDO	12
4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	14
4.1	MATERIALES	14
4.1.1	Árido	15
4.1.2	Propiedades mecánicas de la fibra PVA	17
4.2	CONFECCIÓN DE PROBETAS Y VIGUETAS	18
4.2.1	Dosificaciones	18
4.2.2	Cantidad de ensayos	19
4.2.3	Descripción geométrica	21
4.2.4	Confección de probetas cilíndricas	21
4.2.5	Confección de Viguetas	23
4.3	ENSAYOS	24
4.3.1	Ensayos a Tracción	24
4.3.2	Ensayo a Compresión	26
4.3.3	Ensayo a Flexión	27
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
5.1	ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA	28
5.1.1	Análisis de Tensiones máximas a Tracción	29
5.1.2	Análisis del comportamiento dúctil a Tracción	30
5.1.3	Análisis de probetas ensayadas a tracción	31
5.2	ENSAYO A COMPRESIÓN	32
5.2.1	Análisis de Tensiones máximas a compresión	33
5.2.2	Análisis del comportamiento dúctil a compresión	34
5.2.3	Análisis de probetas ensayadas a compresión	35
5.3	ENSAYO A FLEXIÓN	36
5.3.1	Análisis de Tensiones máximas a flexión	36
5.3.2	Análisis del comportamiento dúctil a flexión	38
5.3.3	Análisis de probetas ensayadas a flexión	39
5.3.4	Tensiones residuales	40
5.4	COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS	42
5.4.1	Tensiones máximas	42
5.4.2	Deformaciones Últimas	44
5.4.3	Energía Post-fisuración	47
6	CONCLUSIÓN	49
7	BIBLIOGRAFÍA	52
	ANEXOS	54
	ANEXO A	54
	Calibración de los sensores LVDT	54

Índice de Figuras

Figura 3-1 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria a compresión (McCormac y Brown, 2017) .	
4 Figura 3-2 Comportamiento tensión-deformación generalizado bajo tensión directa y fallas. (Sadaqat Ullah Khan, Tehmina Ayub, 2016)	6
Figura 3-3 Fibra de Alcohol Polivinílico (PVA), largo 12[mm]	7
Figura 3-4 Comportamiento de puente en la grieta. (Sasmal, S. and Avinash, G. 2006)	8
Figura 3-5 Fallo de probetas de microfibra de hormigón. Bajo compresión. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010.	9
Figura 3-6 Fallo de probetas de hormigón bajo tensión. (a) Sin refuerzo. (b) Con refuerzo. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010.	10
Figura 3-7 Resultados ensayo a compresión de FCR con fibra de PVA. Ayub, T., Khan. 2019.	10
Figura 3-8 Relación carga-deflexión para probetas de vigas reforzadas con microfibras. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010	11
Figura 3-9 Curva ensayo tracción directa para árido intermedio. Arenas, 2021.	12
Figura 3-10 Curva ensayo tracción directa para árido grueso. Arenas, 2021.	13
Figura 4-1 Tamices. Rebecco, J. 2021.	15
Figura 4-2 Curva granulométrica	17
Figura 4-3 Fibra PVA Larga 30 [mm]	20
Figura 4-4 Fibra PVA Corta 12 [mm]	20
Figura 4-5 Molde Cilíndrico	21
Figura 4-6 Mezcladora. Arenas, 2021.	22
Figura 4-7 Molde vigueta	23
Figura 4-8 Pegado de la probeta en discos	24
Figura 4-9 Montaje Ensayo a Tracción	25
Figura 4-10 Montaje Ensayo Compresión	26
Figura 4-11 Montaje Ensayo Flexión	27
Figura 5-1 Diagrama Ensayo a Tracción directa – M1	29
Figura 5-2 Diagrama Ensayo Tracción Directa – M2	30
Figura 5-3 Modo de Fallo Ensayo a Tracción	31
Figura 5-4 Diagrama Ensayo a Compresión – M1	33
Figura 5-5 Diagrama Ensayo a Compresión – M2	34
Figura 5-6 Modos de Falla Ensayo a Compresión	35
Figura 5-7 Diagrama Ensayo a Flexión – M2	37
Figura 5-8 Diagrama Ensayo a Flexión – M2	38
Figura 5-9 Modo de Falla Ensayo a Flexión	39
Figura 5-10 Gráfico Tensiones Residuales M1	40
Figura 5-11 Gráficos Tensiones Residuales M2	41
Figura 5-12 Variación Porcentual Tensiones Máximas M1	42
Figura 5-13 Variación Porcentual Tensiones Máximas M2	43
Figura 5-14 Variación Porcentual Deformaciones Últimas M1	45
	VI
Figura 5-15 Variación Porcentual Deformaciones Últimas M2	45

Figura 5-16 Energía Post-fisuración M1	47
Figura 5-17 Energía Post-fisuración M2	48
Figura 0-1 Lectura 1 – LVDT 1	54
Figura 0-2 Lectura 2 – LVDT 1	55
Figura 0-3 Lectura 1 – LVDT 2	55
Figura 0-4 Lectura 2 – LVDT 2	56
Figura 0-5 Ejemplo gráfico de la función TRAPZ. Mathworks, Soporte (Centro de ayuda)	58
Figura 0-6 Código MATLAB para el cálculo de energía	58

Índice de Tabla

Tabla 3-1 Propiedades típicas de las fibras (Mehta & Monteiro, 2006)	5
Tabla 4-1 Materiales para la confección de probetas	14
Tabla 4-2 Análisis granulométrico	16
Tabla 4-3 Propiedades de la fibra de PVA	17
Tabla 4-4 Dosificación M1 y M2	18
Tabla 4-5 Cantidad de ensayos por mezcla.	19
Tabla 4-6 Dimensiones de probetas	21
Tabla 5-1 Resultados ensayo tracción directa	28
Tabla 5-2 Resultados Ensayo a Compresión	32
Tabla 5-3 Resultados Ensayo a Flexión	36
Tabla 5-4 Tensiones Residuales	40
Tabla 5-5 Resumen Tensiones Máximas	42
Tabla 5-6 Resumen Deformaciones Últimas	44
Tabla 5-7 Energía Post-fisuración	47
Tabla 0-1 Puntos de Calibración LVDT 1	56
Tabla 0-2 Puntos de Calibración LVDT 2	57

1 Introducción

1.1 Motivación

El hormigón es uno de los materiales más usados en cuanto se habla de construcción, debido a que posee propiedades que permiten tener una estructura con una alta durabilidad y resistencia. Principalmente posee excelentes cualidades al momento de ser sometido a cargas de compresión, debido a que su resistencia a este tipo de acciones es alta. Por otro lado, su resistencia a la tracción es muy baja, al igual que su capacidad de resistir deformaciones, dado a que es un material de baja ductilidad, por lo cual tiende a generar fisuras o a fracturarse con facilidad, es por ello que nace lo que comúnmente hoy en día se conoce como el hormigón armado, el cual consiste en insertar barras o mallas de acero con el fin de que tanto su resistencia a la tracción mejore considerablemente, esto gracias a que las cargas de aplicadas en esta acción las toman directamente las barras de acero. Debido a sus excelentes propiedades, es el material de construcción más usado en Chile para proveer de seguridad y alta resistencia en los elementos estructurales que componen una edificación, en donde la mayoría posee dimensiones de altura considerable al punto de que tanto las cargas provocadas por el viento como las mismas generadas por sismos afecten el comportamiento de la estructura.

Si bien, el hormigón armado es altamente eficiente para el trabajo de diferentes tipos de cargas, se ha buscado de forma continua de cómo mejorar la ductilidad del hormigón puro, de este punto nace la implementación de fibras para una mejora sustancial a esta propiedad. La implementación de fibras como refuerzo se ha estudiado como una alternativa a este problema, tales fibras, las cuales poseen un largo menor a 18 mm, ha mejorado considerablemente la ductilidad que posee, actuando como puente en la fisura de la matriz distribuyendo la carga a lo largo de esta para evitar su expansión.

Dentro de la gran cantidad de fibras, existe un tipo de esta llamada fibras de polivinilo de alcohol o simplemente denominada por su sigla PVA. La PVA posee un módulo de elasticidad alto y una alta capacidad de establecer fuertes enlaces químicos en la matriz de cemento, logrando un comportamiento que evite la expansión de la grieta la cual pueda dañar de forma considerable los elementos estructurales, aumentando la seguridad y la capacidad de resistir deformaciones del hormigón. Por otro lado, la PVA posee un bajo impacto en la huella de carbono, por lo que es considerada como amigable con el medio ambiente.

Actualmente los estudios han demostrado que el uso de microfibras de PVA cortas (6 a 18 mm aprox.) mejora el comportamiento al ser sometido a tracción, pero disminuye su resistencia a la compresión levemente, por otro lado, si se disminuye el tamaño máximo de árido, el porcentaje de descenso de la resistencia a la compresión es menor, con la contraparte de que disminuye la resistencia del hormigón puro dado que se tiene áridos más pequeños. También se ha demostrado que, a un mayor uso de fibras en la mezcla, mayor cantidad de aire es retenido dentro de esta disminuyendo su capacidad máxima a compresión. Sin embargo, la adición de PVA aumenta la

deformación post-peak de una curva tensión-deformación, proporcionando al hormigón una tasa decreciente más baja y un aumento en su capacidad residual. Esto se debe principalmente a la capacidad de la fibra de generar puentes en las grietas evitando su expansión.

Dado los estudios previos realizados, se busca analizar el comportamiento del hormigón al añadir una mezcla de microfibras de PVA largas, específicamente con un largo de 30 mm, junto con fibras cortas de largo 12 mm, de la cual es la que compone la gran parte de la literatura, esto con dos diferentes mezclas de áridos con el fin de encontrar un óptimo en las propiedades del hormigón con fibra.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento que posee el hormigón al incorporar fibras de PVA (Alcohol Polivinílico), considerando el uso en probetas de una mezcla de fibras largas y cortas.

2.2 Objetivos específicos

- Análisis bibliográfico de fibras de PVA.
- Estudio del comportamiento de mezclas de fibras de PVA.
- Análisis del comportamiento del hormigón con mezclas de fibras de PVA en ensayo de tracción.
- Análisis del comportamiento del hormigón con mezclas de fibras en ensayo de compresión directa.
- Análisis del comportamiento del hormigón con mezclas de fibras en ensayo de flexión.

3 Marco Teórico

En el siguiente capítulo se presenta una recopilación de información obtenida a través de diferentes papers que presentan estudios hechos y publicados para la obtención de conocimientos iniciales para el trabajo a realizar.

3.1 Literatura

Como punto de partida, consiste en recopilar la mayor cantidad de información que abarque principalmente la temática sobre el hormigón con fibra, en donde se obtienen datos de microfibras de PVA, sus mezclas y su comportamiento tanto en la trabajabilidad como en los diferentes ensayos hallados.

3.2 Características del Hormigón

El hormigón se caracteriza por ser un material similar a la piedra, el cual se obtiene de una mezcla de cemento, arena, grava (u otro agregado grueso) y agua (Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan. 2017). Por otro lado, para mejorar o simplemente cambiar sus propiedades dependiendo del uso al cual se le destine, este puede ser mezclado con uno o más aditivos, modificando principalmente su trabajabilidad junto con el tiempo de fraguado (McCormac y Brown, 2017). Dado a que es un material de alta durabilidad y relativamente de bajo costo, es el elemento más usado en el mundo de la construcción, y este se caracteriza principalmente por su alta resistencia a la compresión. En contraparte es un material sumamente frágil el cual posee una baja resistencia a la tracción, es por ello que nace el concepto de hormigón armado, el cual consiste en usar barras de acero como refuerzo para mejorar la resistencia a la tracción, esto debido a que este último material posee grandes cualidades como elemento sometido a esta acción (Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan. 2017).

El hormigón simple, comúnmente alcanza su resistencia máxima a compresión (f'_c) a los 28 días, variando su valor entre los 5 MPa y 60 Mpa, esto dependiendo del uso del cual fuese solicitado. Como ya se mencionó con anterioridad, es un material sumamente frágil, es por ello que su capacidad a la deformación es casi nula, es decir, al momento de alcanzar su máxima resistencia, la curva post-peak decae rápidamente demostrando fallas frágiles post-fisuración (Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan. 2017).

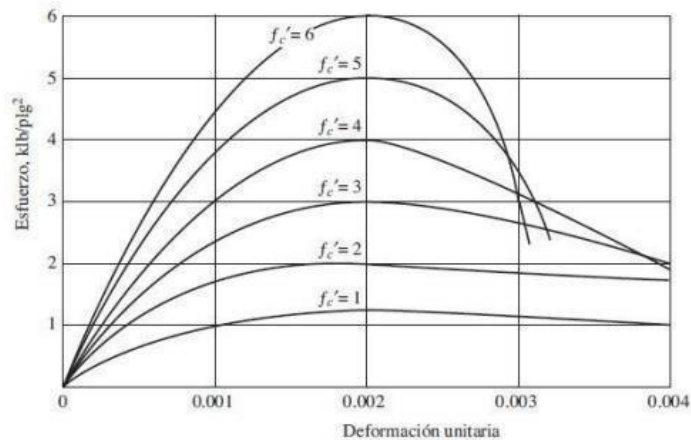


Figura 3-1 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria a compresión (McCormac y Brown, 2017)

3.3 Hormigón con fibra (FRC).

Como alternativa, se estudia el uso de fibras como elemento de refuerzo dentro de la matriz cementosa, distribuyéndose de forma aleatoria en este, de aquí nace el concepto de Hormigón con Fibra, o conocido con sus siglas en inglés FRC (Fiber-Reinforced Concrete). El uso de fibras sintéticas como refuerzo proviene desde el primer elemento fabricado que fue el cemento de asbesto, el cual fue desarrollado alrededor de 1900. Actualmente el uso de fibra como refuerzo se amplía a materiales como resinas epoxi, plásticos y cerámicas (Bentur & Mindess, 2007).

La principal función de la fibra como refuerzo es aumentar la ductilidad y resistencia a la tracción del hormigón, no solo evitando la aparición de grietas, sino que también en la presencia de una, estas actúan como puente distribuyendo los esfuerzos a lo largo de la fisura, evitando su propagación en el elemento estructural. (Medeiros, 2012). Como principales propiedades influyentes en el comportamiento del hormigón con fibra se deben considerar las siguientes; debido a que existe una variedad de fibras en el mercado, cada una puede asignar propiedades diferentes como refuerzo, así como también el volumen de esta que se considere para la mezcla. Por otro lado, es de suma importancia el largo de la fibra como la orientación de ella en el elemento estructural. Tales puntos se deben considerar para un resultado distinto al momento de estudiar el comportamiento del hormigón. El FRC depende tanto de las propiedades que caracterizan cada fibra como las cualidades de la mezcla del hormigón. (Mehta & Monteiro, 2006).

Tabla 3-1 Propiedades típicas de las fibras (Mehta & Monteiro, 2006)

Tipo de fibra	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Young [10² MPa]	Deformación
Acero	280-2760	2	25-45
Acrílico	210-410	80-140	~0,6
Algodón	410-690	5	3-10
Asbesto	550-970	70	1,5-3,5
Lana de roca	480-760	4	16-20
Nylon	760-830	8	11-13
Poliéster	730-860	0,1-0,4	~10
Polietileno	~690	4	~25
Polipropileno	550-690	7	10-25
Seda artificial	420-620	70-120	~0,6
Vidrio	1040-3800	200	0,5-30

Según la ACI 544.1R-96, existen tres tipos de falla que respectan a la tensión directa para una matriz cementosa reforzada con fibras cortas:

- La falla tipo I consiste en fracturas compuestas inmediatamente después del agrietamiento de la matriz, es una respuesta de ablandamiento por deformación, esto se debe principalmente a un uso inadecuado de la fibra, considerando un largo insuficiente o un contenido inadecuado de esta, insuficiente para realizar la transferencia de carga a través de la grieta.
- La falla tipo II en donde el elemento continúa llevando una carga decreciente después del pick, la resistencia posterior al agrietamiento es debido a la extracción de la fibra, la tenacidad y una mayor energía de fractura aumenta, pero no de forma significativa.
- La falla tipo III es cuando el material compuesto continúa resistiendo una carga creciente post rotura de matriz, en este tipo tanto la resistencia máxima como la deformación correspondiente son bastante más que la matriz sola.

Estos tres tipos de fallas se pueden observar más específicamente en la Figura 3-2, en donde se tiene un gráfico Strain-Stress el cual caracteriza de forma precisa todos los modos de fallas ya descritos. (Sadaqat Ullah Khan, Tehmina Ayub, 2016.)

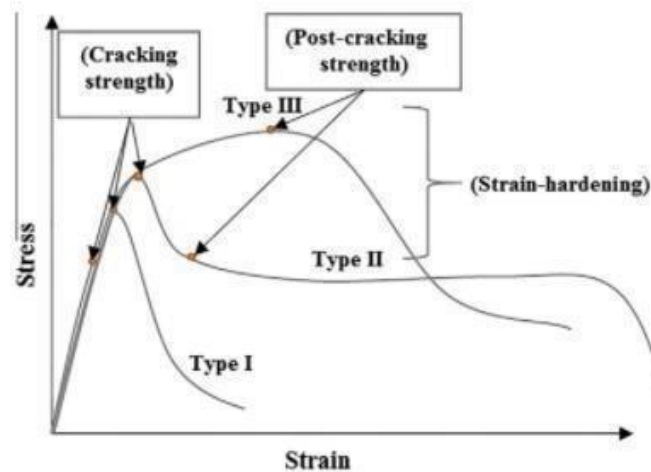


Figura 3-2 Comportamiento tensión-deformación generalizado bajo tensión directa y fallas. (Sadaqat Ullah Khan, Tehmina Ayub, 2016)

3.4 Hormigón con fibra PVA.

En el mercado existe una gran variedad de fibras sintéticas polivinílicas, o expresamente en sus siglas en inglés PVA (Polyvinyl Alcohol), considerado un producto relativamente nuevo.

La fibra de PVA es un elemento estable y duradero en el ambiente alcalino generado por la matriz de hormigón, es por ello que puede trabajar sin considerar un daño al momento de hacer la mezcla, junto con su alta resistencia a la tracción (0.8-1.6 GPa), su módulo de elasticidad (23-40 GPa) y superficie hidrofílica esta fibra logra crear un fuerte enlace químico con la matriz cementosa. Si bien la fibra de PVA se caracteriza con una alta resistencia a la tracción, esta posee una baja resistencia a cargas laterales, en donde llega a su ruptura rápidamente. (A. NOUSHINI; B. SAMALI; K. VESSALAS, 2013).



Figura 3-3 Fibra de Alcohol Polivinílico (PVA), largo 12[mm].

La función de la fibra PVA es distribuir la carga dentro de la matriz cementosa, aplicando la carga de manera uniforme dentro del elemento, de esta forma evita fisuras, y en casos de la presencia de una, logra actuar como puente distribuyendo los esfuerzos a lo largo de la grieta, evitando su expansión y/o conexión con otras, de esta forma, la matriz logra un comportamiento dúctil, adquiriendo una resistencia a la tracción mayor junto con una mejor resistencia a las deformaciones (Sasmal, S. and Avinash, G. 2006).

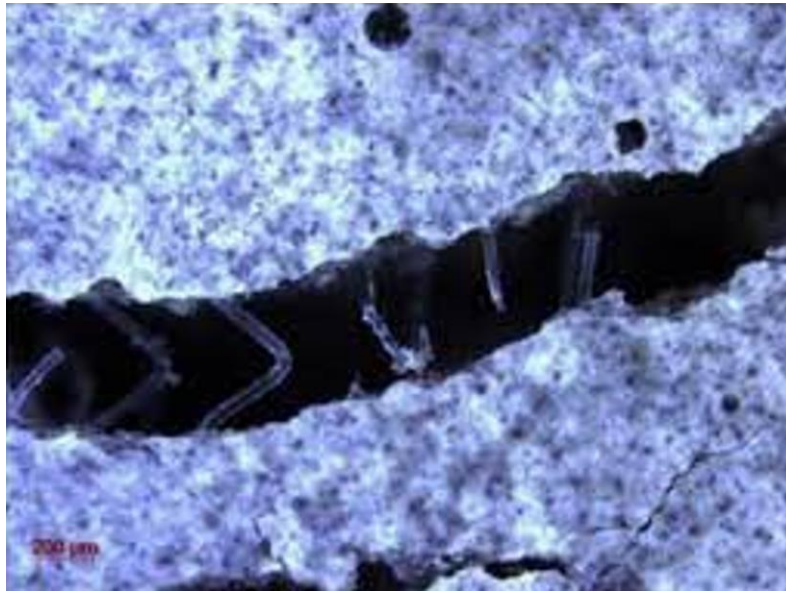


Figura 3-4 Comportamiento de puente en la grieta. (Sasmal, S. and Avinash, G. 2006)

Por otro lado, los estudios que abarcan el FCR con fibra de PVA, han determinado un pequeño inconveniente que posee este elemento dentro de la matriz, es decir, al momento de ser sometida a tracción. Entre ambos elementos existe un roce, generando un efecto de abrasión y delimitación de la fibra, de esto nace el uso de la fibra PVA aceitada, aumentando la capacidad hidrófoba de la fibra y disminuyendo los efectos adversos que generaba la conexión de una fibra sin aceitar con la matriz. (Redon, C., Li, VC, Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. Ogawa, A. 2001).

3.5 Comportamiento del FRC con fibras de PVA.

La diferencia de comportamiento respecto a una matriz sin microfibras es considerable. En un hormigón sin refuerzo bajo tensión, la probeta empieza a mostrar una microfisura la cual se propagó a medida que se aumentaba la carga, por otro lado la muestra reforzada con microfibras de PVA, las grietas iniciales aparecen en la matriz de cemento pero la velocidad de propagación es mucho más lenta que la matriz de cemento sin refuerzo, esto se debe principalmente a la capacidad de la microfibras de PVA de limitar el agrietamiento dada a su alta resistencia en colaboración con materiales cementosos. Esto es comparable en los siguientes ensayos; En la Figura 3.5 se muestra falla dúctil de los especímenes ensayados en compresión y constituidos por agregado de caliza y 3% de microfibras, en la Figura 3-6, ensayados a tensión indirecta, se notó que la falla en los discos de concreto simple era muy frágil (a), por otro lado, se observó falla dúctil en el hormigón reforzado con fibra (b). (Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010).



Figura 3-5 Fallo de probetas de microfibras de hormigón. Bajo compresión. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010.

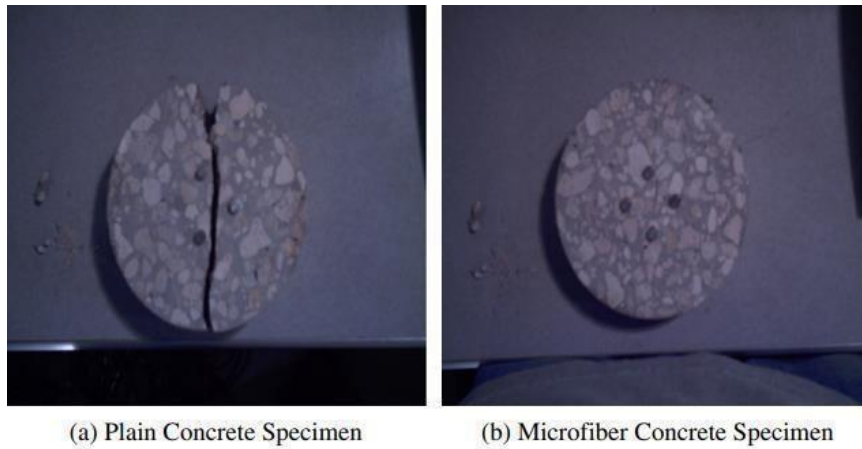


Figura 3-6 Fallo de probetas de hormigón bajo tensión. (a) Sin refuerzo. (b) Con refuerzo. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010.

Junto con un tamaño máximo de árido de 19 mm, y refuerzos de fibras de PVA de 0%, 1%, 2% y 3% en ensayo a compresión, se logra demostrar que la variación de resistencia máxima que presenta cada probeta con su respectiva mezcla es baja, por ende, se destaca que a medida que se va agregando mayor cantidad de fibras en la matriz, esta no presenta una variación significativa en su peak. Por otro lado, la respuesta a la deformación muestra una mejora sustancial en el rango de la curva post-fisuración con respecto a la matriz cementosa sin refuerzo, esto se puede observar en la Figura 3-7. (Ayub, T., Khan. 2019).

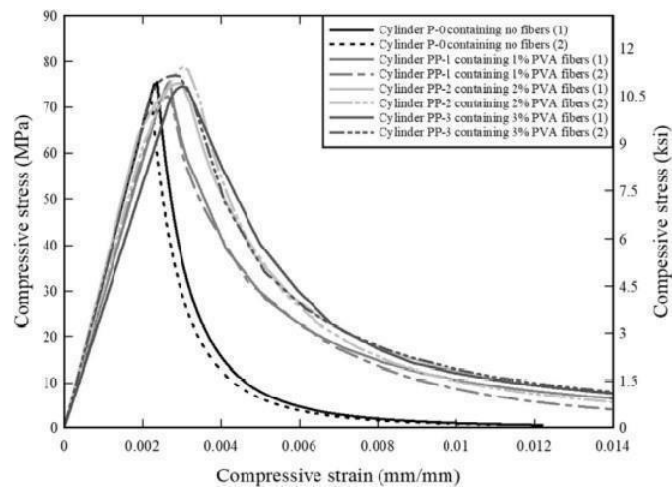


Figura 3-7 Resultados ensayo a compresión de FCR con fibra de PVA. Ayub, T., Khan. 2019.

Los ensayos a flexión lograron mostrar resultados que sirvieron para producir las curvas de carga-deflexión de las vigas de concreto reforzado con microfibras junto con vigas similares que contienen varillas de acero, estas curvas se muestran en la Figura 3-8. Los resultados de la prueba muestran un aumento notable en la capacidad de absorción de energía o tenacidad después de la fisura. (Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010).

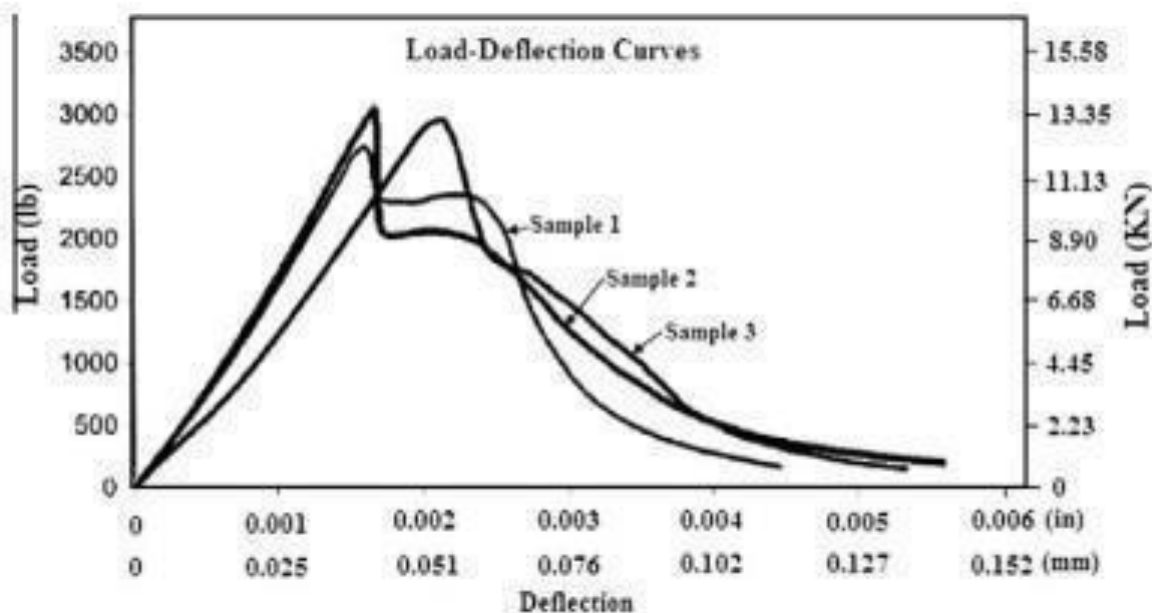


Figura 3-8 Relación carga-deflexión para probetas de vigas reforzadas con microfibras. Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, 2010

Para ensayos de tracción directa, se obtiene que el comportamiento dúctil aumenta a medida que se va aumentando la cantidad de fibras, esto se logra observar en la Figura 3.9, en el caso de Arenas, 2021, este posee 3 diferentes dosificaciones de fibras correspondientes a 0%, 1.23% y 2%. Dado estos porcentajes, quien posee un mayor comportamiento dúctil con respecto a etapa post- fisuración es la mezcla con 2% de fibra. Por otro lado, se observa un aumento en la tensión máxima considerable en comparación a la probeta sin refuerzo, logrando aumentar más del 50% de esta. Cabe destacar que esta capacidad de aumento de la tensión máxima, disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo de árido.

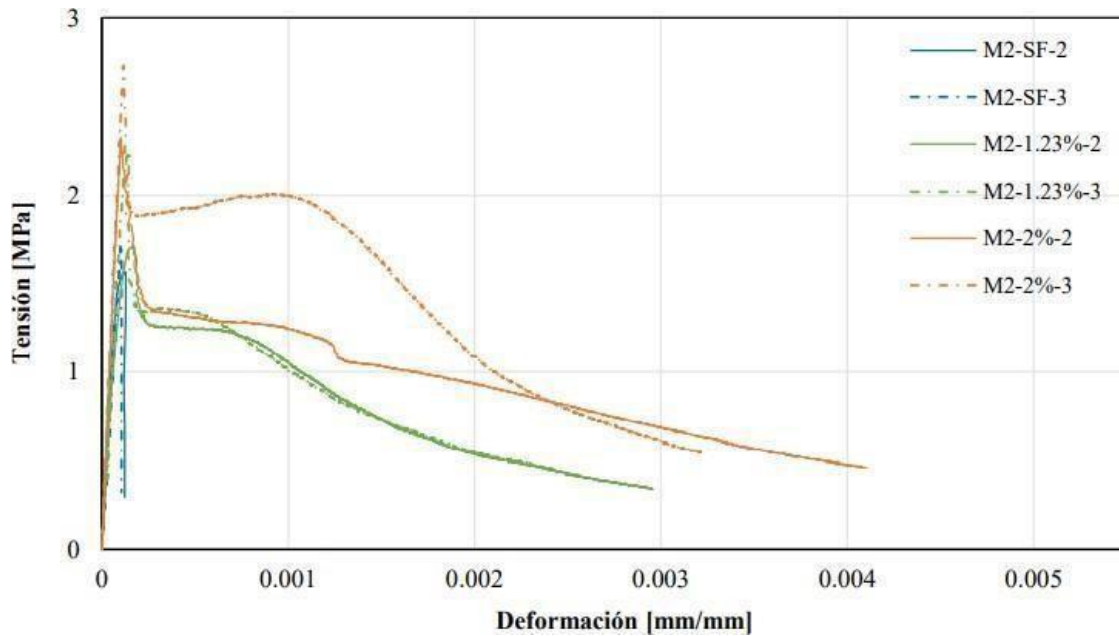


Figura 3-9 Curva ensayo tracción directa para árido intermedio. Arenas, 2021.

3.6 Influencia del tamaño máximo de Árido

Se sabe que el efecto que provoca el tamaño de árido a usar en el hormigón es de suma importancia por ello, Arenas, 2021, logró mostrar en ensayos de tracción la influencia del tamaño de árido con respecto al comportamiento que posee, es decir, con mezclas que poseen fibra REC 15/12 mm aceitada junto con tres dosificaciones diferentes variando el tamaño máximo de árido, considerando 19 mm, 9.5 mm y 0.6 mm, se da a conocer que a medida que la mezcla sea más fina, esta presentará un aumento en la tensión máxima a tracción, es por ello que este autor relaciona este comportamiento a que a un tamaño de árido mayor, en donde las fibras no logran una distribución uniforme dentro de la matriz, provocando espacios vacíos y de acumulación.

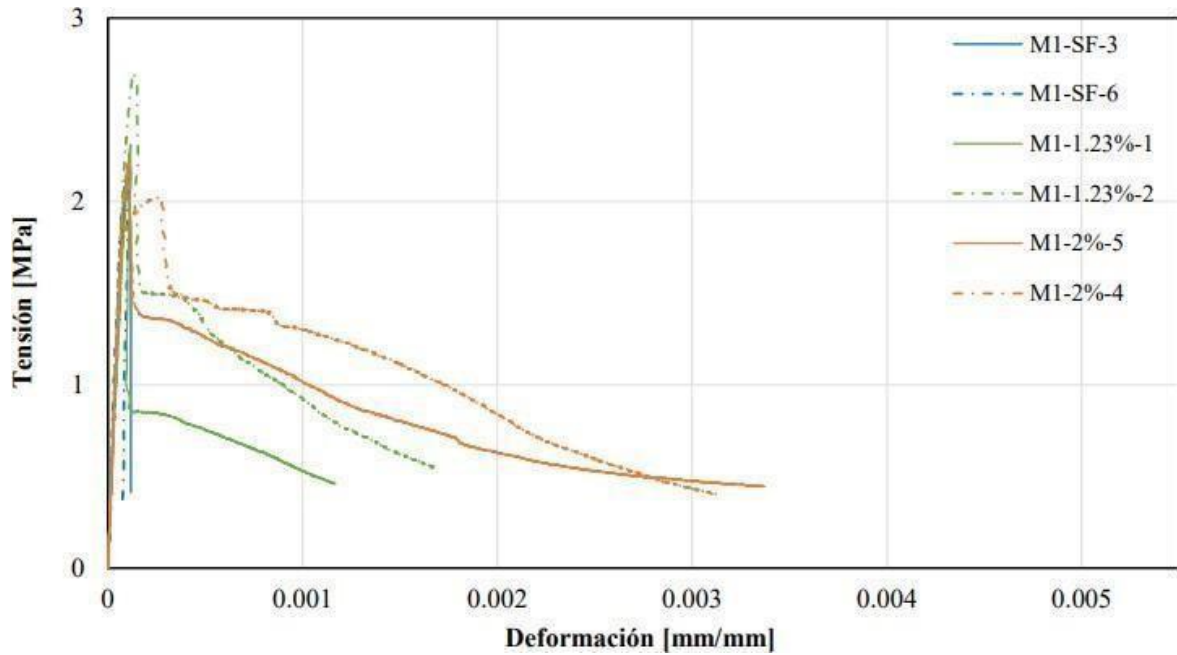


Figura 3-10 Curva ensayo tracción directa para árido grueso. Arenas, 2021.

Logrando comparar tanto la Figura 3-9 como la Figura 3-10, se logra observar este comportamiento de disminución de la tensión máxima debido al tamaño máximo del árido. En donde la mezcla que posee árido con un tamaño máximo de 19 mm, figura con tensiones máximas similares a sus probetas sin refuerzo de fibra. Cabe destacar que el comportamiento dúctil post-fisuración es visible en ambos casos.

4 Metodología Experimental

En el presente capítulo se explica el desarrollo para la confección de probetas y viguetas. quienes serán usadas para los ensayos de tracción, compresión directa y flexión. De forma inicial, se da a conocer los materiales los cuales se componen cada probeta junto con su respectiva dosificación y su modalidad de uso para los ensayos de tracción y compresión directa.

4.1 Materiales

En la siguiente tabla, se especifican los materiales para la elaboración del hormigón que se usarán para la mezcla 1 y la mezcla 2.

Tabla 4-1 Materiales para la confección de probetas

Material	Comentario
Fibra PVA	Fibra largo 12 mm, KURAKAY CO, LTD.
Fibra PVA	Fibra largo 30 mm, KURAKAY CO, LTD.
Cemento	Polpaico
Gravilla	Rio Maipo
Arena Fina	Rio Maipo
Arena Gruesa	Rio Maipo
Aditivo Plastificante	Sika Viscocrete
Agua	Potable

4.1.1 Árido

Se realiza un análisis de granulometría tanto para el árido fino como para el árido grueso, según lo indicado por la norma ASTM-C 136. La cual especifica la clasificación granulométrica de los áridos a través de tamices. Todo esto para una correcta descripción de los materiales.

De forma inicial, se mezcla todo el árido existente de forma individual, es decir, juntar todo el árido fino y el árido grueso, cada uno por separado, logrando una mezcla homogénea, y así extraer una muestra que sea lo suficientemente representativa de cada árido.

Una vez que cada árido esté mezclado de forma homogénea, se extraen 500 gramos de árido fino y 500 gramos de árido grueso, y conforme a lo que dicta la norma ASTM-C 136, dado que el tamaño máximo de partícula en la gravilla es de 19 mm, se debe extraer 5 kilogramos de este material. Cada muestra se deja reposar en el horno a 60°C por 24 horas, así se asegura un correcto secado de cada una.

Pasada las 24 horas, se extraen las muestras del horno para posteriormente realizar el análisis granulométrico, para ello se utilizan tamices como los que se muestran en la Figura 4-1. Estos elementos poseen una malla con una apertura específica, de esta forma deja pasar el grano más pequeño obteniendo así la clasificación de tamaños del material.



Figura 4-1 Tamices. Rebecco, J. 2021.

Una vez realizado el procedimiento anterior, se obtiene el análisis buscado, clasificando el tamaño de grano de cada una de las muestras, esto queda descrito en la Tabla 4-2 y de manera gráfica se logra observar en la Figura 4-2.

Tabla 4-2 Análisis granulométrico

Tamiz N°	Diámetro [mm]	Arena Fina	Arena Gruesa	Gravilla
2 1/2"	63.0	100%	100%	100%
2"	50.0	100%	100%	100%
1 1/2"	37.5	100%	100%	100%
1"	25.0	100%	100%	100%
3/4"	19.0	100%	100%	93%
1/2"	12.5	100%	100%	42%
3/8"	9.5	100%	100%	19%
#4	4.75	97%	86%	2%
#8	2.36	95%	61%	0%
#10	2.00	94%	55%	0%
#30	0.600	91%	24%	0%
#40	0.425	89%	17%	0%
#50	0.300	83%	11%	0%
#100	0.150	42%	4%	0%
#200	0.075	10%	1%	0%

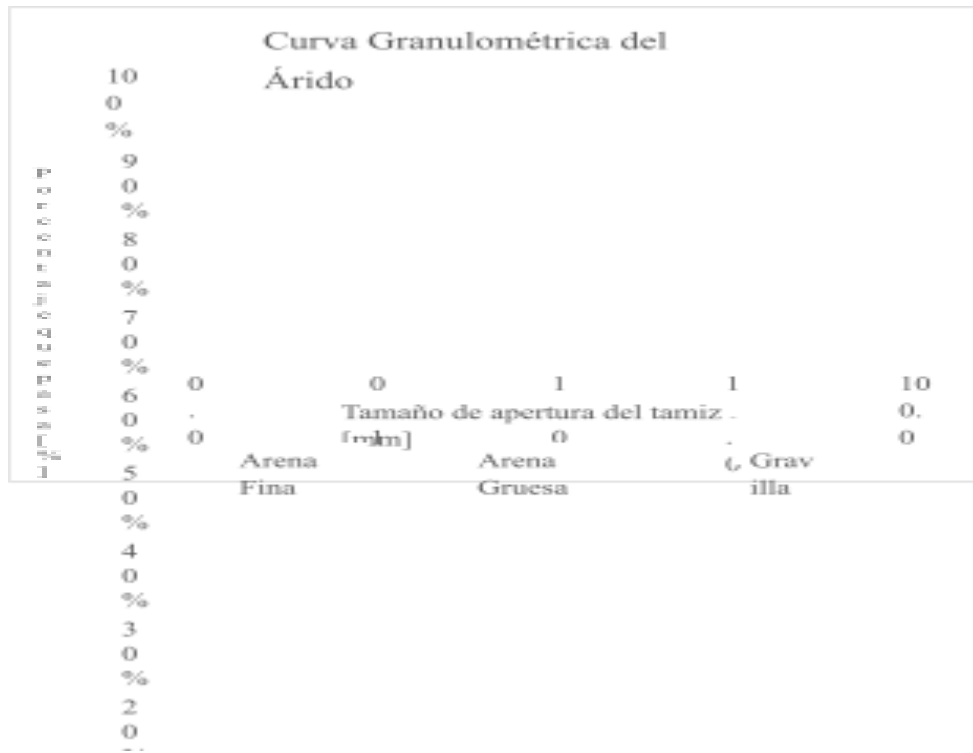


Figura 4-2 Curva granulométrica

4.1.2 Propiedades mecánicas de la fibra PVA

Estas propiedades tanto mecánicas como geométricas están descritas en la Tabla 4-3. Cabe destacar que estos datos se obtienen tanto de la memoria de **Cortez J., 2022**, junto con los datos descritos del producto dados por el proveedor KURAKAY Co., Ltd.

Tabla 4-3 Propiedades de la fibra de PVA

Fibra	Largo [mm]	Diámetro [mm]	Resistencia a Tracción [MPa]	Módulo de Elasticidad [Gpa]	Densidad [g/cm ³]
RECS	12	0.004	1560	41	1.29
15/12	30	0.66	820	12.7	1.29

4.2 Confección de probetas y viguetas

En la siguiente subsección se detallará tanto las dosificaciones como las propiedades geométricas tanto de las probetas cilíndricas como las viguetas.

4.2.1 Dosificaciones

Las dosificaciones a usar se obtienen de la memoria de **Arenas A., 2021**, para efecto de estudio se toman solo 2 dosificaciones, cuyo objetivo es diferenciar el comportamiento del FCR dado el tamaño máximo del árido. Las dosificaciones quedan especificadas en la Tabla 4-4, en donde se tiene la mezcla 1 (M1) y la mezcla 2 (M2).

Tabla 4-4 Dosificación M1 y M2

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Gravilla (kg/m ³)	Arena gruesa (kg/m ³)	Arena Fina (kg/m ³)	Tamaño máx. de partícula (mm)
1	796	406	980	637	477	19
2	796	406	0	1197	898	4.75

Con respecto al porcentaje de volumen fibra de PVA, esto se obtiene de la memoria tanto de **Arenas A. 2021** como de **Reveco J. 2021**, de este modo poder comparar los resultados de ambos con los obtenidos en estos ensayos. Para ello se tomarán tres diferentes volúmenes de fibra, 0%, 1.23% y 2%. Cabe destacar que dentro de los dos últimos volúmenes de fibra se considerará que el 30% corresponderá a fibras cortas y el otro 70% restante a fibras largas.

Ambos autores consideran una relación agua-cemento de 0.51, es por ello que, para efecto de este estudio, se mantendrá tal valor. Por otro lado, al agregar fibras de PVA disminuye considerablemente la trabajabilidad del hormigón, frente a esto se agregan 5 ml de aditivo plastificante por probeta en la mezcla 1 y el doble para la mezcla 2, dado que **Reveco J. 2021**, logra mostrar que al aumentar la cantidad de fibras y disminuir el tamaño del árido este no logra comportarse de manera correcta al momento de ser vaciados en los moldes.

4.2.2 Cantidad de ensayos

Teniendo tanto las dosificaciones de las muestras como el porcentaje de fibra de cada una, se determina la cantidad de ensayos a realizar, tanto para probetas cilíndricas como para las viguetas, de esta forma se considera un programa experimental detallando.

Tabla 4-5 Cantidad de ensayos por mezcla.

Mezcla	Ensayo	Volumen de Fibra	N° de ensayos	Total de ensayos por mezcla		
1	Compresión	0%	2	18		
		1.23%	2			
		2%	2			
	Tracción	0%	2			
		1.23%	2			
		2%	2			
	Flexión	0%	2			
		1.23%	2			
		2%	2			
	2	Compresión	0%		2	18
			1.23%		2	
			2%		2	
Tracción		0%	2			
		1.23%	2			
		2%	2			
Flexión		0%	2			
		1.23%	2			
		2%	2			

Como se puede observar se tiene un total de 36 elementos, entre probetas cilíndricas y viguetas a ensayar.



Figura 4-3 Fibra PVA Larga 30 [mm]



Figura 4-4 Fibra PVA Corta 12 [mm]

4.2.3 Descripción geométrica

Teniendo la cantidad de elementos que se deben confeccionar, se describe la geometría de estos, para ello, se considera una relación de 1:2 en las probetas cilíndricas, caracterizando un alto de 210 mm y un diámetro de 105 mm, estos moldes se confeccionarán a través de tubos de PVC. Por otro lado, los moldajes de las viguetas tienen una dimensión de 530 mm de largo, 150 mm de alto y 150 mm de ancho. Todo esto queda descrito en la Tabla 4.6.

Tabla 4-6 Dimensiones de probetas

Tipo	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho/Diámetro (mm)
Cilíndrica	-	210	105
Vigueta	530	150	150

4.2.4 Confección de probetas cilíndricas

Para el caso de las probetas cilíndricas, se parte armando lo que será el molde de estas, para ello se es necesario cortar tubos de PVC de diámetro 110 mm a una altura de 210 mm, usando tapas del mismo diámetro como base para obtener así el molde completo de la probeta cilíndrica, tal como se puede observar en la Figura 4-5.



Figura 4-5 Molde Cilíndrico

Posteriormente al armado de cada molde cilíndrico, se inicia con el proceso de hormigonado, el cual lleva una serie de pasos y herramientas necesarias descritas a continuación.

Las herramientas a considerar son de suma importancia, dado que de ello depende del resultado de este proceso. Principalmente se usa, para el proceso de mezclado y hormigonado, balanzas de baja y alta precisión, mezclador (Figura 4.6), tineta 20 litros, entre otros.



Figura 4-6 Mezcladora. Arenas, 2021.

Para el proceso de hormigonado, se siguen los siguientes pasos:

- Paso 1: Se pesan todos los materiales. En este paso inicial, se toma el peso de todos los áridos, cemento, agua y fibra (dependiendo de la mezcla a realizar). De este modo todos los elementos, a excepción del agua y la fibra, se revuelven generando una mezcla inicial lo más homogénea posible.
- Paso 2: Mezclado total. Se va agregando en la tineta la mezcla inicial junto con el agua de forma paulatina mientras se va incorporando con la mezcladora, de este modo el proceso no se torna complejo y se evita residuos de material pegados en el borde de la tineta. Una vez que se tenga la mezcla completa y homogénea, se comienza con incluir las fibras dentro de esta, esparciéndolas sobre la superficie uniformemente, evitando grumos o cúmulos de esta mientras va pasando la mezcladora unificando todo.
- Paso 3: Hormigonado. Al momento en que la mezcla esté lista, esta se va agregando al molde partiendo por el primer tercio para poder ser vibrado. Este vibrado consiste en

introducir 25 veces una barra delgada de acero en la mezcla, de esta forma el hormigón se logra esparcir por todo el molde evitando espacios vacíos, posteriormente se golpea el molde por fuera 25 veces, repartido en tandas de 5 mientras se va girando el cilindro, de esta forma se evitan capsulas de aire dentro de la mezcla que podrían afectar los resultados de los ensayos. Una vez realizado el primer tercio, se prosigue con el siguiente, con la diferencia que al insertar las 25 veces la barra de acero delgada, esta debe llegar a la mitad del primer tercio ya vibrado anteriormente.

- Paso 4: Marcado. Finalmente, cada probeta se marca, con siglas que destaquen tanto la mezcla que posee, la dosificación de fibras y la fecha correspondiente para así, contabilizar los 28 días mínimos de fraguado que se deben considerar para ser desmoldadas y ensayadas.

4.2.5 Confección de Viguetas

En el caso de las viguetas, el moldaje a usar es existente (Figura 4-7), estos son de acero y poseen una dimensión de 530 mm de largo, 150 mm de ancho y 150 mm de alto. El proceso de hormigonado es idéntico al realizado para la confección de probetas cilíndricas, presentando algunas diferencias, estas corresponden al uso de desmoldante específicamente topex desmol metal, facilitando el trabajo de extraer las viguetas de su respectivo molde. Por otro lado, dado a la gran cantidad de material que es necesario para la confección de las viguetas, se reemplaza la tineta por un recipiente mucho más grande, el resto de los pasos se mantienen.



Figura 4-7 Molde vigueta

4.3 Ensayos

Una vez pasado el tiempo de fraguado de las probetas, el cual respecta a como mínimo 28 días, se da inicio a los ensayos correspondientes, especificando el procedimiento y montaje de cada uno. Para cada ensayo se es necesario el uso de la maquina universal Instron® modelo 600LX.

4.3.1 Ensayos a Tracción

Este ensayo se efectúa específicamente para probetas cilíndricas, ensayando 12 de estas, considerando 2 ensayos por cada dosificación de fibras. Para ello es necesario adherir ambas caras a discos de acero, este procedimiento se realiza a través de un adhesivo epóxico Sikadur®-31 HMG. Para el montaje de estas probetas se siguen los siguientes pasos:

1. Picado de ambas superficies. Primero, en conjunto con un destornillador paleta y un martillo, se pica suavemente ambas caras de la probeta cilíndrica, generando una superficie porosa que posee mayor adherencia al momento de ser pegada al disco.
2. Posicionamiento y pegado: Una vez terminado el paso anterior, se pegan ambas caras a los discos con ayuda del adhesivo epóxico, procurando que la probeta quede centrada y correctamente posicionada entremedio de ambos elementos de acero. Cabe destacar que la cantidad de epóxico debe ser considerable para así evitar algún tipo de falla por adherencia en el ensayo.
3. Secado: Se debe dejar reposar por al menos 12 horas, para una correcta adherencia. El resultado se puede observar en la Figura 4-8.



Figura 4-8 Pegado de la probeta en discos

Ya teniendo lista la probeta con ambos discos, se procede a montar sobre la maquina universal, para luego instalar dos sensores LVDT verticalmente en la probeta, ambos sensores deben estar separados de tal forma que la distancia entre ellos coincida con el diámetro del elemento a ensayar, dicho de otro modo, que se dispongan en un ángulo de separación de 180°, este montaje final se puede observar en la Figura 4-9.

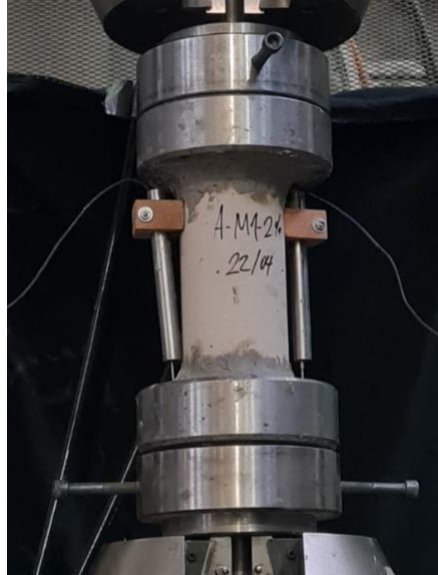


Figura 4-9 Montaje Ensayo a Tracción

Previo al inicio del ensayo, se pretensa con la finalidad de disminuir lecturas erróneas de los LDVT, los cuales son debido al acomodo que posee la maquina con los elementos dispuestos en ella, es por ello que este pretensado, del orden de los 50 kg, es de suma importancia para tener resultados óptimos disminuyendo la posibilidad de errores, finalmente se comprueba que ambos sensores funcionen correctamente dando inicio al ensayo de tracción.

Cabe destacar que la velocidad de este ensayo corresponde a 0.5 mm/min y el ensayo finaliza una vez alcanzado el 20% de la carga máxima.

4.3.2 Ensayo a Compresión

Análogamente al ensayo de tracción, se busca estudiar 12 probetas, considerando 2 ensayos por cada dosificación de fibra, tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2. El requisito primordial para este ensayo consta principalmente en tener ambas caras de las probetas lisas y paralelas entre sí, es decir, que el elemento a ensayar sea lo más perfecto posible, de esta forma obtener resultados limpios evitando errores correspondientes al montaje de esta. Para lograr este trabajo, se debe solicitar la colaboración de IDIEM, en donde se dispone tanto de las herramientas como la capacitación del personal para rectificar las probetas.

Una vez teniendo las respectivas probetas rectificadas, se dispone a lo que corresponde al montaje del ensayo a compresión. Para ello, solo se es necesario el correcto posicionamiento de los LVDT, los cuales se montan a través de un sistema de 2 anillos los cuales envuelven la probeta quien está perfectamente nivelada y centrada de tal forma que la distancia del perímetro de la probeta al perímetro interno del anillo sea siempre la misma, de este modo ambos anillos quedan correctamente posicionados, este montaje se logra observar en la Figura 4-10.



Figura 4-10 Montaje Ensayo Compresión

Ya instalado los LVDT, se posiciona, centradamente, la probeta en la maquina universal, para posteriormente ser pretensada hasta un valor de 50 kg aproximadamente. Con el objetivo de que se logren acomodar los elementos que dispone la máquina, obteniendo así lecturas óptimas del ensayo el cual posee una velocidad correspondiente a 0.3 mm/min y este, al igual que el ensayo a tracción, finaliza una vez alcanzado el 20% de su carga máxima.

4.3.3 Ensayo a Flexión

Con lo que respecta al ensayo a flexión, el montaje es simple, dado que solo cambia los apoyos junto con el elemento que aplicará la carga sobre la vigueta. Para realizar este procedimiento, se usará el ensayo a tracción de tres puntos, en donde existen 2 apoyos inferiores para la vigueta junto con una carga superior en el medio de esta. La distancia entre apoyos corresponde a 40 cm, por otro lado, el tramo que va desde cada apoyo al borde de la cara cuadrada de la vigueta, es de 6.5 cm. Esto permite que la carga quede aplicada en el centro de la vigueta logrando un ensayo simétrico y óptimo.

De acuerdo al posicionamiento de los LVDT, estos se instalan uno en cada cara rectangular (Figura 4.9), en donde a través de un sistema quedan puestos de forma externa a la vigueta, junto con ello se pega, con la ayuda de pegamento Loctite, una placa pequeña de madera que servirá como apoyo logrando como resultado la medida de la deformación del ensayo. Cabe destacar que estos sensores se instalan de tal forma que quede en el centro a lo largo de la probeta.



Figura 4-11 Montaje Ensayo Flexión

Una vez instalado cada elemento, previo al comienzo del ensayo, se pretensa hasta un valor de 50 Kg de carga aproximadamente, con el objetivo de que cada pieza de la maquina se acomode, evitando errores de lecturas en el rango inicial, una vez listo se procede a realizar el ensayo. Cabe destacar que este ensayo posee una velocidad de 0.3 mm/min.

5 Resultados y Análisis

En el presente capítulo se dará a conocer los resultados obtenidos de los ensayos de tracción directa, compresión y flexión, junto con un análisis de los datos que se obtuvo de cada ensayo.

5.1 Ensayo a Tracción directa

A continuación, se presentan los resultados del ensayo a tracción directa, en donde se caracteriza una curva de tensión-deformación en donde los datos a usar corresponden inicialmente a las lecturas registradas por los sensores LVDT, el cual describe la etapa de pre-fisuración, junto con los datos de la máquina universal, de quien se extraen el registro del ensayo en la etapa post-fisuración.

Tabla 5-1 Resultados ensayo tracción directa

Mezcla	Probeta	f'_t (MPa)	ϵ_{cr} (mm/mm)	ϵ_{ult} (mm/mm)	E_c (Mpa)	Energía a Post- Fisuración (J)
M1	M1-0-V1	1.80	0.00020	0.00022	17871	0.07
	M1-0-V4	2.41	0.00022	0.00023	16969	0.11
	M1-123-V1	2.63	0.00002	0.00207	5597	2.51
	M1-123-V2	1.71	0.00016	0.00150	8046	1.41
	M1-2-V1	2.42	0.00001	0.01070	1272412	13.64
	M1-2-V2	2.67	0.00021	0.00328	13044	4.32
M2	M2-0-V1	1.49	0.00020	0.00020	11843	0.12
	M2-0-V2	1.68	0.00019	0.00018	15266	0.12
	M2-123-V1	2.70	0.00007	0.00459	27206	5.47
	M2-123-V2	2.28	0.00018	0.00282	18689	3.47
	M2-2-V1	2.72	0.00028	0.01522	12811	23.77
	M2-2-V2	2.59	0.00024	0.01100	11906	16.54

f'_t : Tensión máxima a tracción.

ϵ_{cr} : Deformación en el peak máximo de tensión a tracción.

ϵ_{ult} : Deformación alcanzada al 80% de decaimiento de la tensión máxima.

E_c : Módulo de Elasticidad

5.1.1 Análisis de Tensiones máximas a Tracción

Con respecto a los valores de tensiones máxima, se logra observar una tendencia al aumento de esta, a medida que el refuerzo de fibra es mayor. De forma específica, en la mezcla de árido grueso (M1) en las probetas con refuerzo de 1.23% de fibra, se ve un incremento del 3.1%, sin embargo, las que poseen un 2% de fibra obtienen un aumento considerable del 20.1%. Por otro lado, en la mezcla con árido fino, estos aumentos son significativamente mayores, es decir para los especímenes de la mezcla 2 (M2), existe un aumento del 57.1% para las probetas con 1.23% de refuerzo y un aumento del 67.5% de la tensión máxima con 2% de fibra. Cabe destacar que estos porcentajes son comparando la tensión máxima que poseen las probetas de hormigón puro, dichos valores son obtenidos a través de la Tabla 5-1.

Como se puede comparar, el incremento de la tensión máxima a tracción es directamente proporcional al aumento de refuerzo de fibra que posea cada probeta, de esto cabe destacar que el 2% de refuerzo en ambas mezclas presenta un promedio de tensión máxima óptimo y similar, obteniendo en M1 una tensión máxima promedio de 2.55 [MPa] y para M2 un valor de 2.65 [MPa], una variación pequeña considerando el aumento considerable que sostienen con respecto a los valores de los especímenes sin fibra.

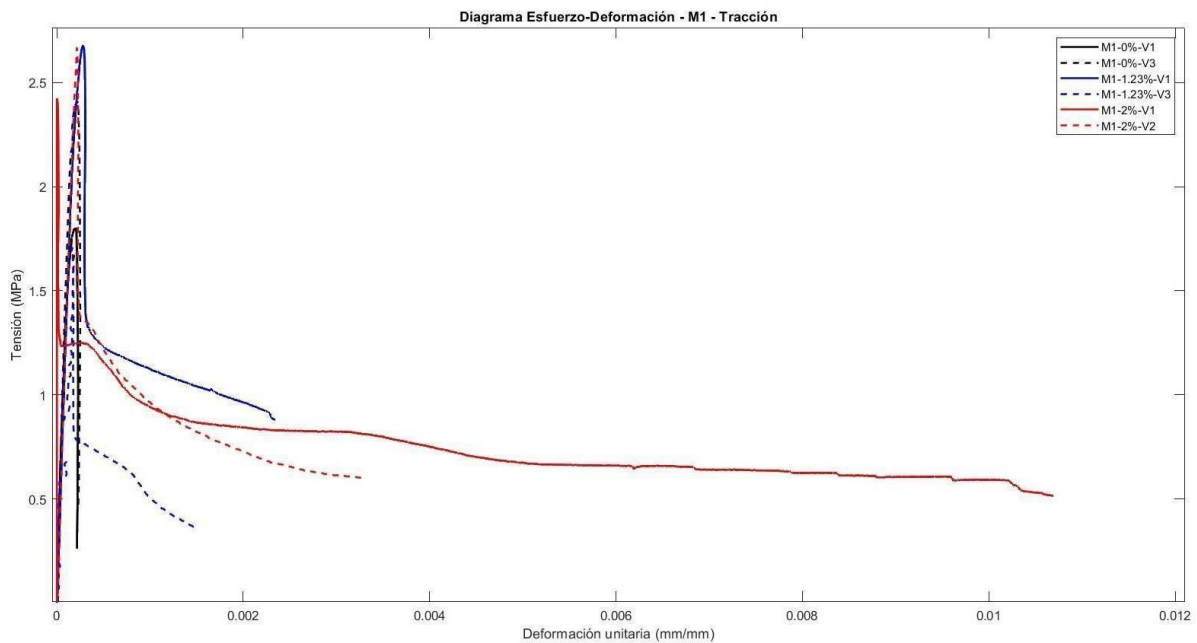


Figura 5-1 Diagrama Ensayo a Tracción directa – M1

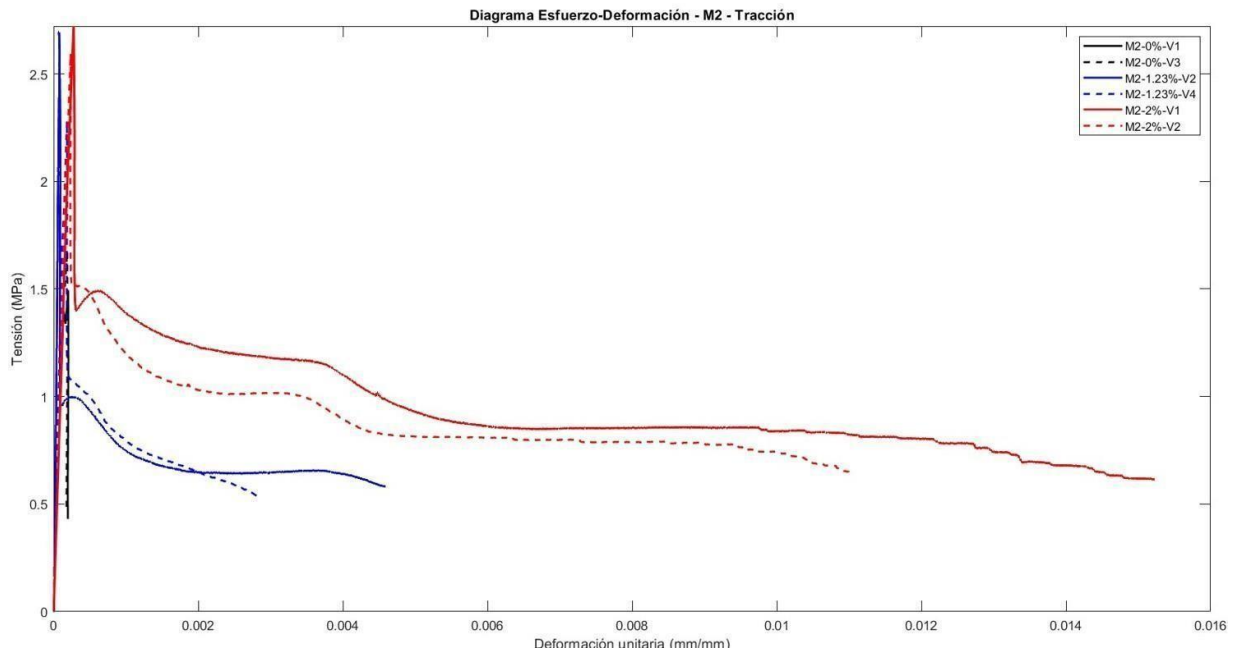


Figura 5-2 Diagrama Ensayo Tracción Directa – M2

5.1.2 Análisis del comportamiento dúctil a Tracción

En el comportamiento de ductilidad que presenta el ensayo a tracción se logra destacar lo siguiente, en ambas mezclas, tanto M1 como M2, se observa un incremento en la ductilidad el cual es directamente proporcional al aumento de fibra que refuerza a cada una. Por otro lado, y como se puede observar tanto en la Figura 5.1 como en la Figura 5-2, el punto de degradación de la curva tiende a ser mayor en el espécimen con 2% de fibra en comparación al 1.23% de refuerzo de esta y junto con esto, el comportamiento post-fisuración tiene a representar una curva mayormente dúctil en las probetas de 2% que en las de 1.23% de fibra.

Tanto en la mezcla de árido grueso (M1) como en la de árido fino (M2), el valor de deformación última de los especímenes de 2% de refuerzo de fibra poseen un valor significativamente mayor respecto a las probetas con 1.23% de refuerzo y 0% de esta, superando el 0.01 [mm/mm] (Tabla 5- 1), dicho de otro modo, para M1-2% este valor respecto a M1-0% es 48.6 veces mayor, y para M2- 2% al comparar con su espécimen sin refuerzo, el valor de deformación última es 69 veces mayor. Por otro lado, la diferencia de ductilidad en deformaciones últimas entre el mismo valor de refuerzo de fibra es bajo, por ello se puede destacar que ambas mezclas poseen un comportamiento dúctil similar con pequeñas variaciones que favorecen a la mezcla M2 con una mejor respuesta frente a deformaciones.

5.1.3 Análisis de probetas ensayadas a tracción

Como se logra observar en la Figura 5-3, el modo de falla de todas las probetas ensayadas fue similar a las tres imágenes que se muestran, es por ello que se consideran ensayos correctamente realizados, dado que la fibra logra actuar correctamente dentro de la matriz, observando respuestas de endurecimiento por deslizamiento junto con una distribución uniforme de las fibras dentro de la matriz cementosa.



Figura 5-3 Modo de Fallo Ensayo a Tracción

Finalmente se puede destacar el similar comportamiento que poseen ambas mezclas en lo que respecta a los ensayos a tracción, considerando que la mezcla de fibra larga como corta puede ser el responsable de este registro.

5.2 Ensayo a compresión

En el presente reparto, se da a conocer los resultados del ensayo a compresión, cabe mencionar que este ensayo se realiza a una velocidad de 0.3 mm/min. Del mismo modo que en el ensayo de tracción directa, los datos pre-fisuración caracterizados en las curvas esfuerzo-deformación fueron obtenidos a través de los sensores LVDT, y siguiendo con el procedimiento, los datos obtenidos para la curva post-fisuración se determinan a través de la lectura de la maquina universal.

En la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos para lo que respecta a los ensayos a compresión.

Tabla 5-2 Resultados Ensayo a Compresión

Mezcla	Probeta	f'_c (MPa)	ϵ_{cr} (mm/mm)	ϵ_{ult} (mm/mm)	E_c (Mpa)	Energía Post- Fisuración (J)
M1	M1-0-V2	35.72	0.0038	0.0007	15929	119.57
	M1-0-V3	32.17	0.0035	0.0058	12311	122.36
	M1-123-V1	36.52	0.0052	0.0219	5285.1	450.46
	M1-123-V2	36.27	0.0043	0.0091	14768	240.00
	M1-2-V1	42.64	0.0036	0.0080	14041	369.09
	M1-2-V2	41.03	0.0035	0.0121	18664	520.72
M2	M2-0-V1	31.92	0.0045	0.0009	11616	44.15
	M2-0-V2	32.08	0.0058	0.0010	10622	40.82
	M2-123-V1	37.57	0.0048	0.0078	15847	201.79
	M2-123-V2	37.77	0.0053	0.0086	10236	234.05
	M2-2-V1	32.44	0.0041	0.0153	6416	744.22
	M2-2-V2	34.91	0.0048	0.0106	14735	311.09

f'_c : Tensión máxima a compresión.

ϵ_{cr} : Deformación en el peak de tensión máxima a compresión.

ϵ_{ult} : Deformación alcanzada al 65% de decaimiento de la tensión máxima.

E_c : Módulo de Elasticidad

5.2.1 Análisis de Tensiones máximas a compresión

En lo que sitúa a tensiones máxima, se puede observar una diferencia notoria comparando la mezcla de árido grueso (M1) con la de árido fino (M2). Para M1, se presenta un aumento gradual y directamente proporcional al aumento de fibra dentro de la matriz, tal y como se puede observar en la Tabla 5-2, por otro lado, para M2 los valores de las probetas que presentan un 1.23% de refuerzo de fibra superan a los datos obtenidos en los especímenes con 2% de refuerzo, sin embargo, se destaca que, en ambos casos las tensiones máximas obtenidas son mayores a las del hormigón puro.

Comparando los óptimos tanto para la mezcla M1 como para M2. se obtiene que tales valores se presentan para M1 con 2% de refuerzo de fibra y para M2 con un 1.23% de fibra PVA (Tabla 5.2), en donde dichos datos corresponden en promedio a 41.835 MPa y 37.67 MPa respectivamente, destacando que el valor máximo obtenido se presenta para la mezcla de árido grueso. Para la mezcla M1, el porcentaje de aumento que respecta del óptimo obtenido en comparación al hormigón puro es de 23.24%, de la misma forma esta comparación para la mezcla M2 presenta un valor correspondiente del 17.71%. Destacando nuevamente que el mayor aumento de la tensión máxima se presenta para la mezcla que posee árido grueso.

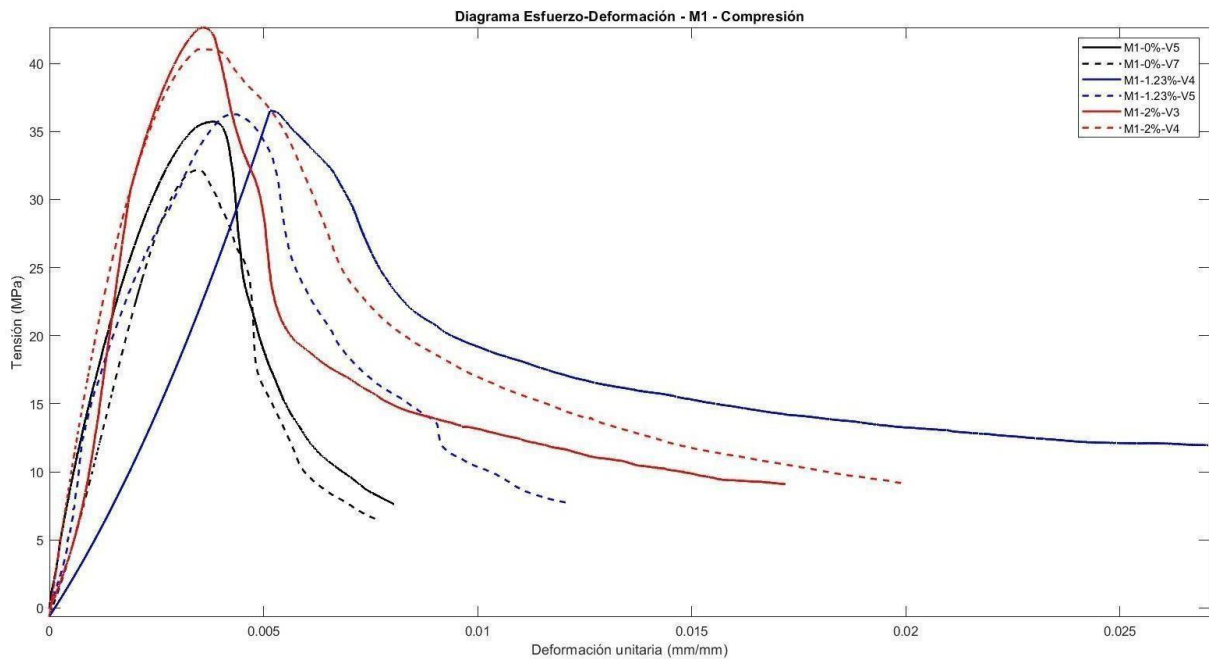


Figura 5-4 Diagrama Ensayo a Compresión – M1

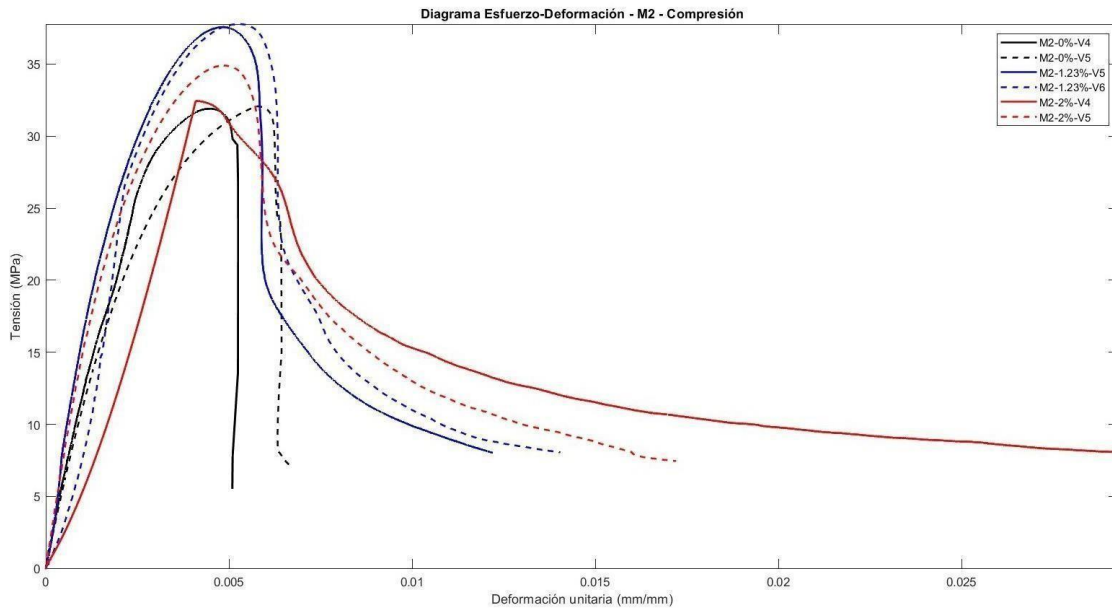


Figura 5-5 Diagrama Ensayo a Compresión – M2

5.2.2 Análisis del comportamiento dúctil a compresión

Para la mezcla con árido grueso, representada en la Figura 5-4, se observa un decaimiento en la curva más prolongada en los especímenes reforzados con fibras de PVA. Tomando en cuenta los ensayos con probetas de 2% de refuerzo, su respuesta frente a la carga es consistente entre ambas versiones, por otro lado, para aquellas ensayadas con 1.23% de refuerzo, presentan una variación notoria entre sí, observable en las curvas azules de la Figura 5-4. Por otro lado, los valores que respecta a las deformaciones últimas entre las probetas con refuerzo y las de hormigón puro no poseen una alta diferencia, es decir, para M1 con 1.23% de fibra su deformación última es de 4.77 veces mayor y para M1 con 2% de refuerzo, este valor con respecto a las probetas M1 sin fibra es 3.1 veces mayor.

Para la mezcla de árido fino, representada en la Figura 5-5, se observa un aumento en la respuesta dúctil directamente proporcional al aumento de refuerzo de fibra, es decir, que a medida que se aumenta la cantidad de fibra dentro de la matriz, la curva de decaimiento es más suave y prolongada, de forma similar, al comparar los datos de los especímenes reforzados con los de hormigón puro presentados en la Tabla 5-2, se obtiene lo siguiente, para la mezcla M2 con 1.23% de fibra, se presenta un valor de deformación última 8.63 veces mayor con respecto a las probetas sin refuerzo, por otro lado, para la mezcla M2 con 2% de PVA este valor es de 13.63 veces mayor, destacando una mejor respuesta a mayor porcentaje de fibra dentro de la matriz.

Comparando la respuesta a deformaciones entre la mezcla M1 y M2, se observa una mejora considerable para las probetas de árido fino, aumentando su ductilidad y capacidad de resistir mayores deformaciones que en su estado puro, por otro lado, y tomando en cuenta los valores de deformaciones últimas, la diferencia entre ambos no es sustancial, obteniendo una mejor respuesta a deformaciones para la mezcla de árido grueso.

5.2.3 Análisis de probetas ensayadas a compresión

Como se logra observar en la Figura 5.6, estos tipos de falla se presentaron en todas las probetas ensayadas a compresión, de izquierda a derecha, fallas en diagonal, columnar y corte, siendo consistentes con los modos de fallas que presentan este tipo de probetas sometidas a cargas de compresión. Por ello se consideran como ensayos correctamente realizados.



Figura 5-6 Modos de Falla Ensayo a Compresión

5.3 Ensayo a flexión

Por último, se muestra lo que corresponde al resultado del ensayo a flexión, en donde del mismo modo que en los ensayos anteriores, el primer tramo correspondiente a las lecturas de los LVDT el cual es utilizado para la curva de esfuerzo-deflexión en el tramo pre-fisuración, y siguiendo con los pasos ya mencionados, para el tramo post-fisuración, se consideran los datos obtenidos por la maquina universal. La velocidad de ensayo corresponde a 0.3 mm/min.

Tabla 5-3 Resultados Ensayo a Flexión

Mezcla	Probeta	f_r (MPa)	δ_{cr} (mm)	δ_{ult} (mm)	Energía Post-Fisuración (J)
M1	M1-0-V1	5.75	0.230	0.232	14.5
	M1-0-V2	3.05	0.139	0.149	6.4
	M1-123-V1	4.10	0.176	3.027	1032.7
	M1-123-V2	4.70	0.257	3.016	1078.2
	M1-2-V1	4.88	0.178	3.482	1686
	M1-2-V2	4.84	0.253	4.103	2211.7
M2	M2-0-V1	2.84	0.200	0.196	0.3
	M2-0-V2	3.45	0.181	0.180	0.8
	M2-123-V1	4.46	0.233	3.472	1337.6
	M2-123-V2	4.30	0.256	4.492	1413
	M2-2-V1	3.82	0.135	5.519	2439.2
	M2-2-V2	4.95	0.272	4.694	2118.2

f_r : Tensión de rotura a flexión.

δ_{cr} : Deflexión en el peak máximo de tensión de rotura.

δ_{ult} : Deflexión alcanzada al 80% de decaimiento de la tensión máxima.

5.3.1 Análisis de Tensiones máximas a flexión

Con respecto a las tensiones máximas de los ensayos a flexión, se obtiene un aumento el cual es directamente proporcional al aumento de refuerzo en fibra (Tabla 5-3), esto considerando ambas mezclas. Cabe destacar que M1-0-V1 es una probeta de tensión máxima superior a cualquier otro espécimen, en comparativa a su versión 2, el cual marca un valor de 3.05 [MPa], en donde no se puede asegurar que dicho valor, de 5.75 [MPa], sea consistente, puesto que se esperan datos que rodeen el obtenido en M1-0-V2, por ello la comparación con sus pares reforzados será a partir de este último valor.

Considerando la mezcla M1, el aumento de tensiones máximas promedio que poseen las probetas con refuerzo de 1.23% es de 44.3% con respecto a la de hormigón puro, por otro lado, para los especímenes con 2% de fibra, este aumento es mayor, obteniendo un incremento del 59.34%.

Para lo que respecta con la mezcla M2, el aumento de tensiones máximas promedio que se obtienen en las probetas de 1.23% de refuerzo de fibra es de 36.72% en comparación a las de

hormigón

puro, del mismo modo, para las probetas con un 2% de fibras, este aumento es mayor, al igual que en la mezcla M1, tomando un incremento del 39.43%.

Comparando el óptimo de cada mezcla se tiene que este se cumple, tanto para M1 como para M2, en las probetas reforzadas con 2% de fibra, logrando un promedio de tensión máxima para M1 de 4.86 [MPa] y 4.39 [MPa] para la mezcla M2, obteniendo una diferencia no muy alta entre sí, destacando una mejora considerable en la mezcla M1 con su respectivo hormigón puro, a diferencia de M2 quien obtiene una mejora en su respuesta, pero no de la magnitud que la mezcla de árido grueso.

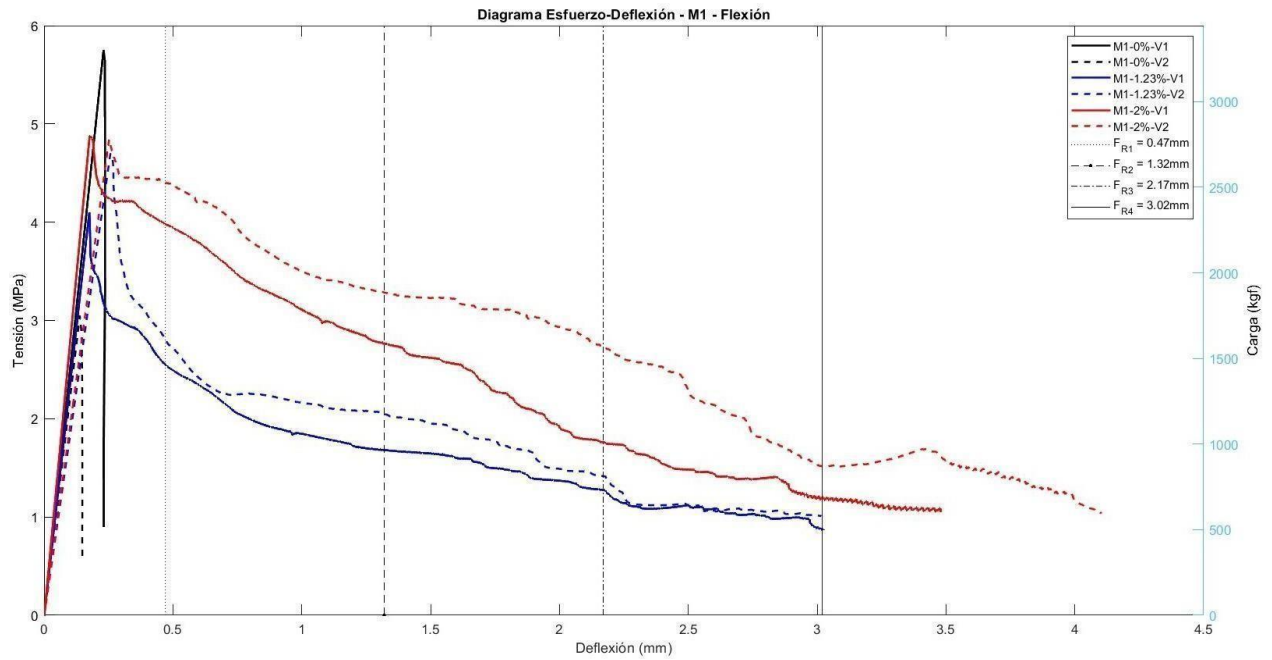


Figura 5-7 Diagrama Ensayo a Flexión – M1

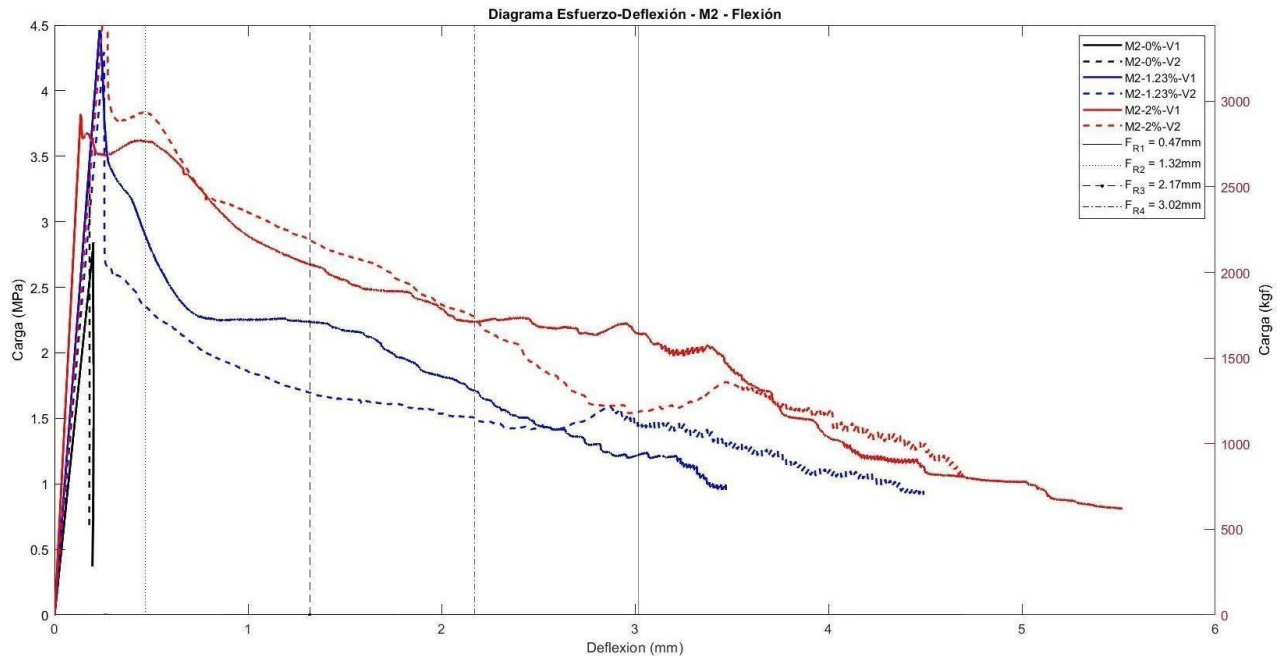


Figura 5-8 Diagrama Ensayo a Flexión – M2

5.3.2 Análisis del comportamiento dúctil a flexión

Analizando el comportamiento dúctil que poseen ambas mezclas, del mismo modo que en tensiones máximas, esta respuesta muestra una mejora a medida que se aumenta el refuerzo de fibra, esto es observable en las Figura 5-7 y Figura 5-8, es decir, comparando las deformaciones últimas alcanzadas se tiene lo siguiente (Tabla 5-3), para M1 el aumento que poseen los especímenes de 1.23% de refuerzo de fibra en comparación a las de hormigón puro es de 16 veces mayor a este valor, por otro lado, el aumento que respecta a las probetas con 2% de fibra es 20 veces mayor con respecto a las probetas sin refuerzos. Del mismo modo, considerando la mezcla M2, estos puntos de comparación son los siguientes, para las probetas que poseen un 1.23% de refuerzo el valor obtenido de deformación última es 23.9 veces mayor respecto a los especímenes de hormigón puro, por otro lado, para la respuesta con las de 2% de PVA, este valor es mayor considerando un dato promedio 27.2 veces mayor a las probetas sin refuerzo.

Comparando los valores óptimos entre mezcla, se tiene de estos datos, para M1 de 3.79 [mm] y para M2 de 5.1 [mm], que la diferencia es significativa, es por ello que la mejor respuesta a las deformaciones se obtiene para la mezcla de árido fino.

5.3.3 Análisis de probetas ensayadas a flexión

El modo de falla que respecta a los ensayos de flexión, se destaca lo siguiente, en todas las viguetas se observa un comportamiento de falla similar mostrada en las tres imágenes de la Figura 5-9, lo cual es una respuesta de falla esperada, es por ello que se consideran que las viguetas fueron correctamente ensayadas.

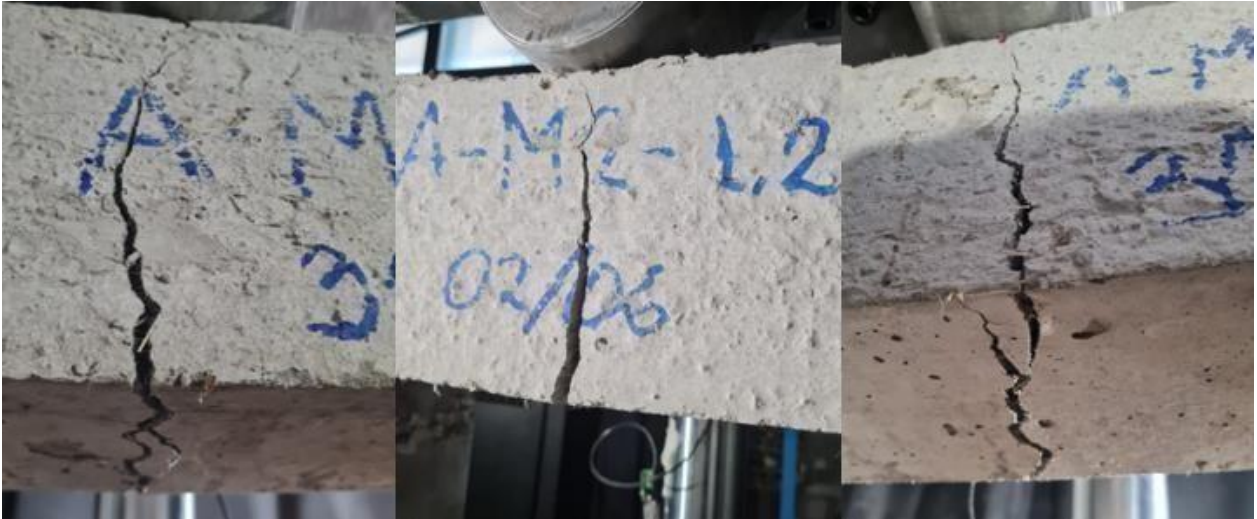


Figura 5-9 Modo de Falla Ensayo a Flexión

5.3.4 Tensiones residuales

En ensayos a flexión, se presentan valores típicos de deformación las cuales destacan valores de tensiones residuales. En donde se caracteriza principalmente 4 puntos (0.47, 1.32, 2.17 y 3.02 mm), los cuales abarcan la deformación de apertura de grieta (CMOD)

Tabla 5-4 Tensiones Residuales

Mezcla	Probeta	f_LOP (MPa)	f _{R1} (MPa)	f _{R2} (MPa)	f _{R3} (MPa)	F _{R4} (MPa)
M1	M1-0-V1	5.75	-	-	-	-
	M1-0-V2	3.05	-	-	-	-
	M1-123-V1	4.10	2.5535	1.6797	1.2758	0.873
	M1-123-V2	4.70	2.8255	2.0546	1.4156	1.0114
	M1-2-V1	4.88	3.9822	2.7625	1.7625	1.1953
M2	M1-2-V2	4.84	4.4086	3.2852	2.7215	1.515
	M2-0-V1	2.84	-	-	-	-
	M2-0-V2	3.45	-	-	-	-
	M2-123-V1	4.46	2.8963	2.2388	1.7121	1.2221
	M2-123-V2	4.30	2.3547	1.6941	1.505	1.481
	M2-2-V1	3.82	3.6115	2.675	2.239	2.1458
	M2-2-V2	4.95	3.8339	2.8611	2.2737	1.5517

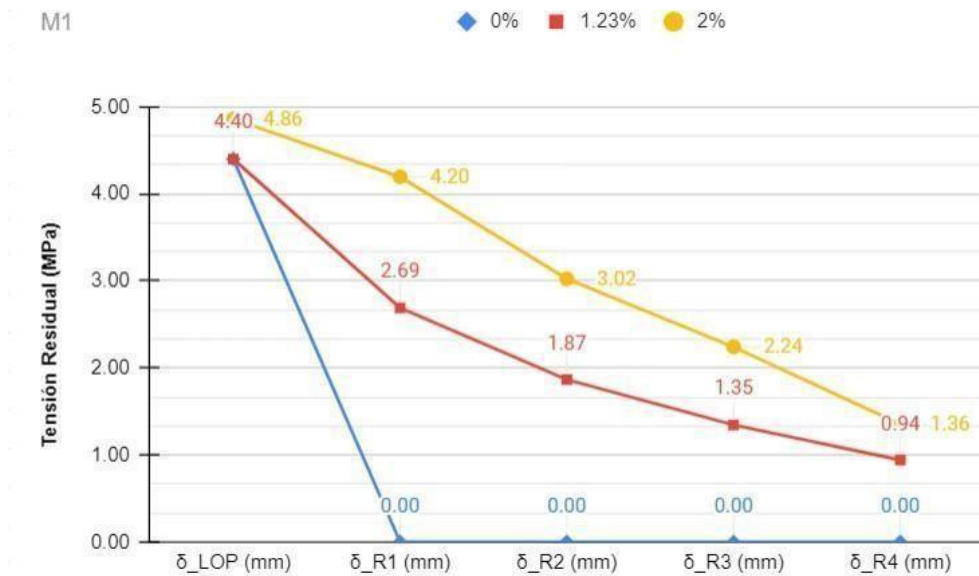


Figura 5-10 Gráfico Tensiones Residuales M1

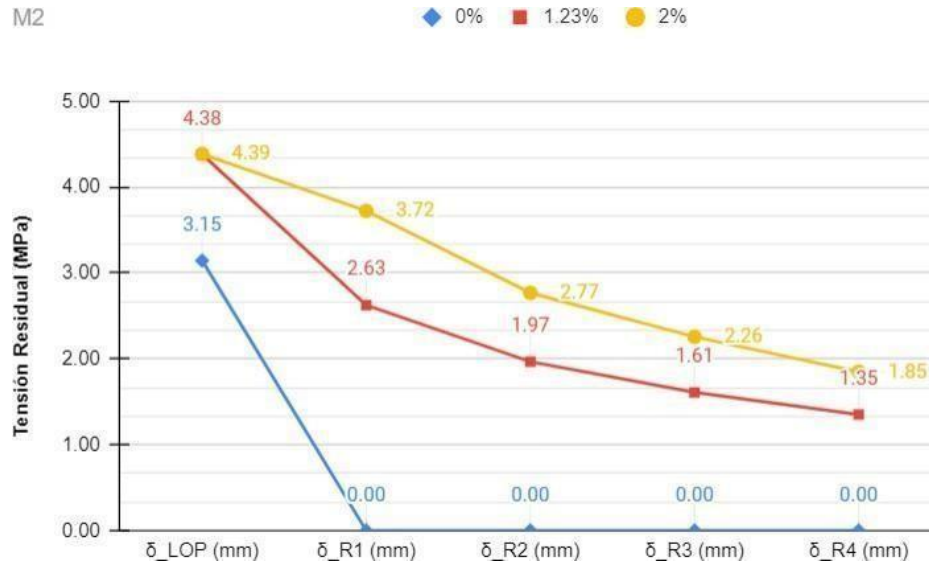


Figura 5-11 Gráficos Tensiones Residuales M2

Con respecto a las tensiones residuales, se logra destacar que, en ambas mezclas, M1 y M2, el comportamiento que posee el refuerzo de fibra genera un aumento en las tensiones de forma consistente, es decir, al observar tanto la Figura 5.10 y 5.11, a medida que se aumenta el refuerzo de PVA, estas tensiones residuales se ven afectadas incrementando de la misma manera, obteniendo curvas con comportamientos similares tanto para aquellas probetas con 1.23% de fibra como de 2% de refuerzo de esta.

Entre las mezclas, M1 como M2, la respuesta que presentan respecto a los gráficos mostrados son similares, es decir, como se menciona anteriormente, el aumento de refuerzo genera un incremento en las tensiones residuales, comportamiento que corresponde tanto para las probetas con árido grueso como fino, es por ello, que las respuestas son gráficamente similares, destacando la poca variación que presentan. Por un lado, y considerando un óptimo de 2% de fibra, M1 presenta valores mayores tanto para FR1 y FR2, sin embargo, para FR3 y FR4 estos valores son levemente superior para M2. Cabe destacar que las diferencias entre tensiones residuales no son significativas, destacando un comportamiento similar frente a deformaciones con refuerzo de fibra de PVA considerando 70% de fibra de un largo de 30 mm y 30% de fibra de un largo de 12 mm.

5.4 Comparación entre ensayos

5.4.1 Tensiones máximas

Se presenta una tabla resumen de las tensiones máximas de cada ensayo, con su respectivo refuerzo. Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Resumen Tensiones Máximas

Mezcla	% Fibra	f'c (MPa)	f't (MPa)	f'r (MPa)
M1	0%	33.95	2.11	3.05
	1.23%	36.40	2.17	4.40
	2%	41.84	2.55	4.86
M2	0%	32.00	1.59	3.15
	1.23%	37.67	2.49	4.30
	2%	33.68	2.66	4.39

En las siguientes figuras (Figura 5-12 y 5-13) se representa de forma gráfica la variación porcentual que presenta el aumento de tensión máxima con su respectivo refuerzo de fibra en comparación a las probetas de hormigón puro.

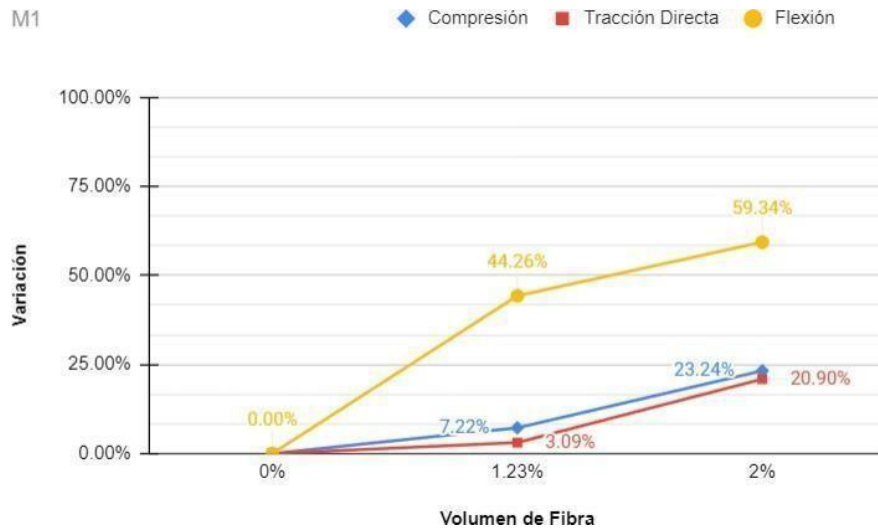


Figura 5-12 Variación Porcentual Tensiones Máximas M1

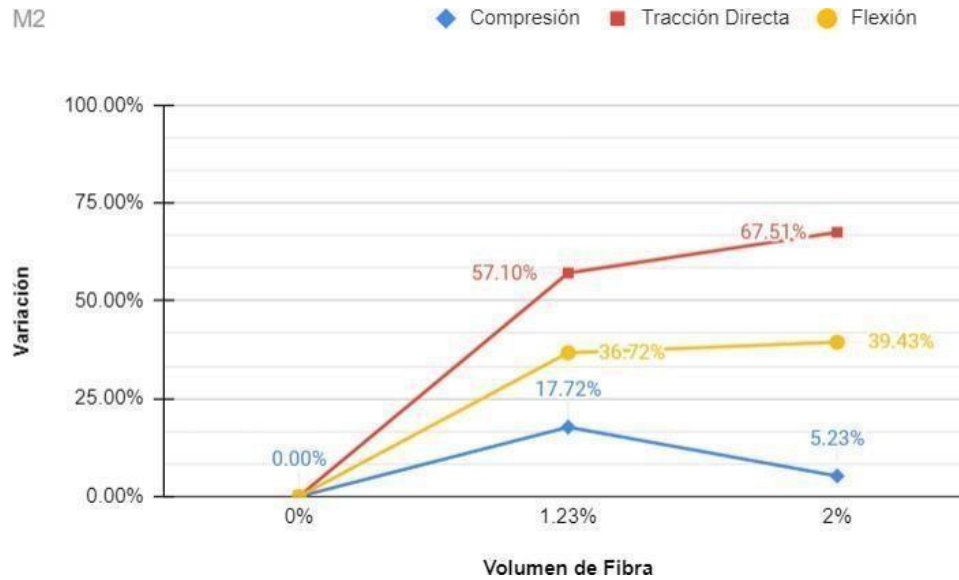


Figura 5-13 Variación Porcentual Tensiones Máximas M2

Para la mezcla M1, mostrada en el gráfico de la Figura 5-12, el aumento en la variación que presenta en las tensiones máximas en los ensayos de compresión y tracción directa son similares, con un porcentaje levemente mayor para el ensayo a compresión. Por otro lado, en el ensayo a flexión, las variaciones en estas tensiones son considerablemente altas, superando el 40% para probetas de 1.23% de refuerzo y llegando casi al 60% con 2% de fibra de PVA, destacando una sustancial mejora en la respuesta a la resistencia máxima para este ensayo. Finalmente se destaca que el aumento de refuerzo de fibra es directamente proporcional al aumento de resistencia máxima que posee el espécimen a ensayar.

Con respecto a la mezcla M2 mostrado en la figura 5-13, la variación porcentual en tensiones máxima se presenta mayormente en los ensayos de tracción directa, seguido por los ensayos a flexión y finalmente los ensayos a compresión presentan una menor variación en la resistencia máxima. Tanto como para los dos primeros ensayos, se logra observar que el aumento de refuerzo de fibra es directamente proporcional al aumento en la tensión máxima obtenida, por otro lado, en el ensayo a compresión, el mayor porcentaje de variación se presenta para los especímenes de 1.23% de fibra de PVA, presentando un decaimiento en esta diferencia tal y como muestra la curva de color azul en la Figura 5.13.

Al momento de comparar entre ensayo se destaca lo siguiente, para el ensayo a compresión, se presenta una mejor respuesta en la variación para la mezcla de árido fino con 1.23%, por otro lado, esto cambia al aumentar el refuerzo a 2%, con una respuesta mejorada en la mezcla de árido grueso, sin embargo y como se muestra en la Tabla 5-5 el valor de resistencia máxima se logra para la mezcla M1 con 2% de refuerzo de fibra. Para el ensayo de tracción directa, se muestra una mejor respuesta a la variación de tensiones máximas en la mezcla M2, es decir, para la mezcla de árido fino, la diferencia entre las probetas reforzadas y las de hormigón puro es significativamente mayor, sin embargo, para M1 esta variación es pequeña, destacando que el refuerzo de PVA logra una mayor mejora frente a la resistencia máxima en mezcla de árido fino que en árido grueso, sin embargo en términos de valores, estas resistencias máximas son similares, tales valores se pueden observar en la Tabla 5.5. En el ensayo de flexión, se observa que, en ambos casos en M1 como M2, se presenta una mejora sustancial en la respuesta a la resistencia máxima, sin embargo, se obtiene una mayor variación en la mezcla de árido grueso, es decir, el refuerzo de fibra de PVA aporta una mejora mayor para este tipo de mezcla, del mismo modo, se obtiene que el valor óptimo de tensión máxima está presente en la mezcla M1 con 2% de fibra.

5.4.2 Deformaciones Últimas

A continuación, se presenta la Tabla 5-6, la cual data un resumen de las deformaciones ultimas que presentan en cada ensayo, con su respectivo refuerzo de fibra.

Tabla 5-6 Resumen Deformaciones Últimas

Mezcla	% Fibra	ϵ_u compresión (mm/mm)	ϵ_u tracción (mm/mm)	δ_u flexión (mm)
M1	0%	0.0033	0.00023	0.190
	1.23%	0.0155	0.00179	3.022
	2%	0.0101	0.01070	3.793
M2	0%	0.0010	0.00019	0.188
	1.23%	0.0082	0.00371	4.492
	2%	0.0130	0.01311	5.107

En las Figuras 5-14 y 5-15 se presentan de forma gráfica la variación porcentual que presenta el aumento de las deformaciones últimas con su respectivo ensayo y refuerzo de fibra. En donde se logra comparar la capacidad de deformación que posee dado la cantidad de fibra de refuerzo junto con el ensayo realizado.



Figura 5-14 Variación Porcentual Deformaciones Últimas M1

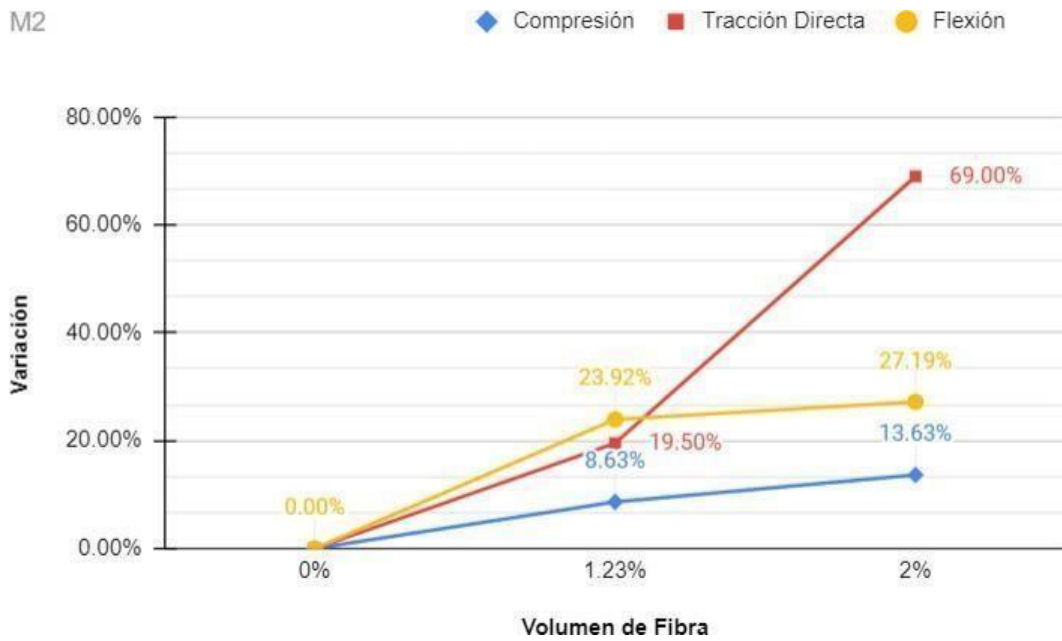


Figura 5-15 Variación Porcentual Deformaciones Últimas M2

Considerando la mezcla M1 (Figura 5-14), la capacidad que posee a la deformación aumenta respecto a una mayor cantidad de refuerzo, sin embargo, esto no se logra en el ensayo a compresión, dado que con un incremento de 1.23% a 2% de fibra, la capacidad que posee frente a la deformación se ve reducida, no obstante, y tal como se puede observar en la Figura 5-14, se obtiene una mejora considerable con lo que respecta a los ensayos de tracción directa y flexión para los especímenes que poseen un 2% de fibra de PVA como refuerzo.

Para la mezcla M2 (Figura 5-15), se observa claramente que el aumento en la deformación última es directamente proporcional al incremento de refuerzo de fibra que posee la probeta, destacando una mejora sustancial en el ensayo a tracción directa con 2% de PVA. Por otro lado, un aumento del 1.23% a 2% en los ensayos de flexión y compresión, supone una mejora respecto a la capacidad de deformación que posee, sin embargo, este incremento es leve.

Tanto para la mezcla de árido grueso como la de árido fino presentan una respuesta similar, en donde el refuerzo de 1.23% logra una mejora en la capacidad de deformación principalmente en el ensayo a flexión, seguido al de tracción directa y por último al de compresión, sin embargo, este orden cambia al aumentar la cantidad de fibra dentro de la matriz, con un 2% se presenta un incremento, respecto a su espécimen de hormigón puro, principalmente en el ensayo a tracción directa, seguido al de flexión y finalmente al de compresión. En ambos casos se presenta un menor beneficio en el ensayo a compresión, en donde la deformación última que poseen las probetas reforzadas en comparación a su similar de hormigón puro no presenta un incremento sustancial, esto se logra observar en la Figura 5-14 y 5-15, en donde la curva de variación de deformación última del ensayo a compresión, siempre está por debajo de los ensayos de tracción directa y flexión.

5.4.3 Energía Post-fisuración

En la siguiente tabla se presenta la energía post-fisuración, en donde se logra mostrar la capacidad de absorción de energía que poseen las probetas en cada ensayo respecto a su similar sin refuerzo.

Tabla 5-7 Energía Post-fisuración

Mezcla	% Fibra	Energía compresión (J)	Energía tracción (J)	Energía flexión (J)
M1	0%	120.97	0.09	10.45
	1.23%	345.23	1.96	1055.45
	2%	444.91	8.98	1948.85
M2	0%	42.49	0.12	0.55
	1.23%	217.92	4.47	1413.00
	2%	527.66	20.16	2278.70

En las siguientes figuras (Figura 5-16 y 5-17) se logra observar de manera gráfica, la capacidad de absorción que poseen las probetas con 0%, 1.23% y 2% de refuerzo de fibra con su respectivo ensayo.

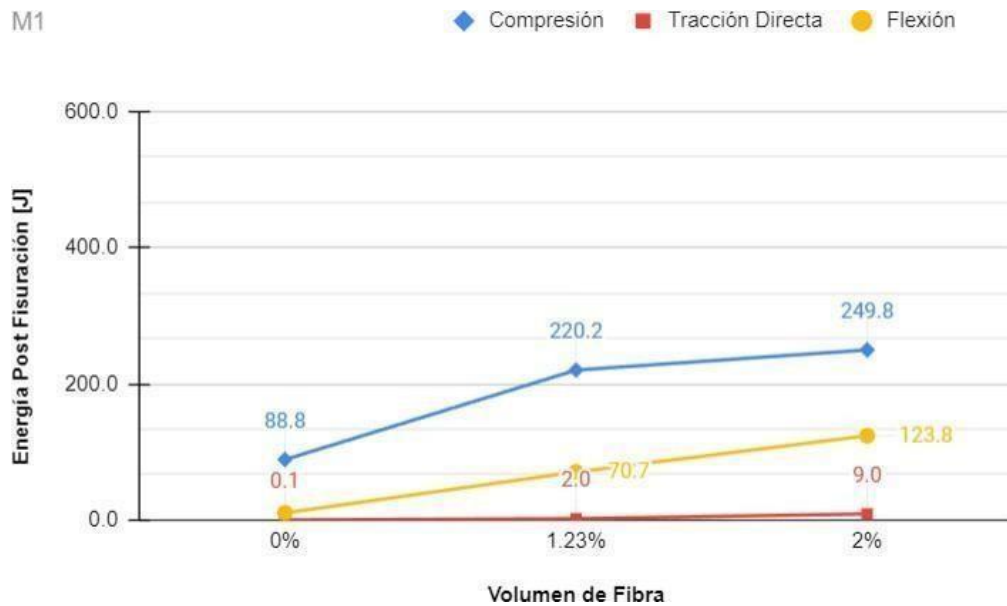


Figura 5-16 Energía Post-fisuración M1

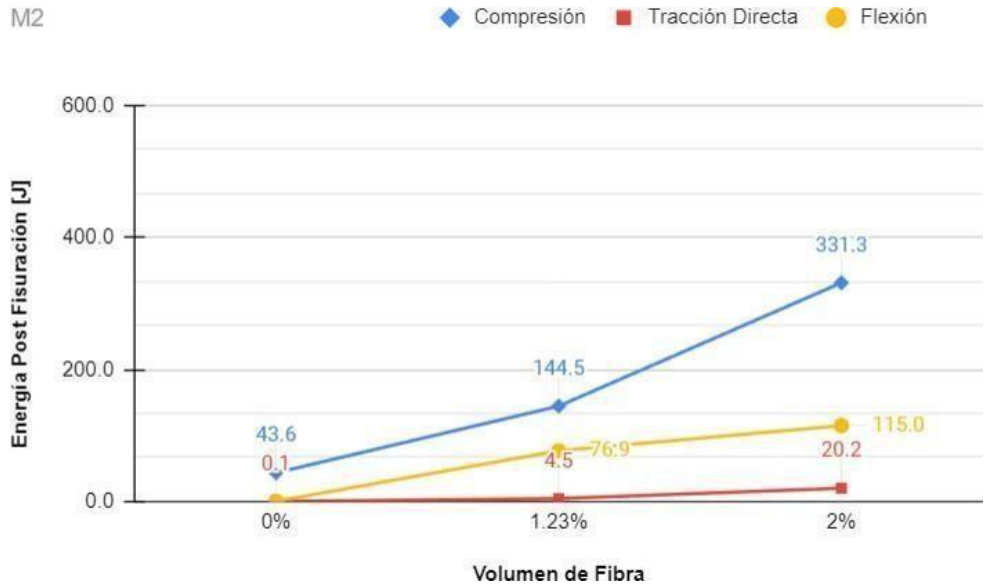


Figura 5-17 Energía Post-fisuración M2

Los datos obtenidos para los parámetros que se graficaron en las Figuras 5-16 y 5-17, se obtienen con las lecturas en tracción directa al 80% de degradación, en compresión al 65% de decaimiento desde el peak máximo y finalmente en el ensayo a flexión con los datos obtenidos en FR₄, visualizado en las Figuras 5-7 y 5-8, en donde la vigueta llega a 3.02 [mm] de deformación.

En lo que respecta para ambas mezclas, M1 como M2, el comportamiento de absorción de energía post fisuración es similar, la cantidad de energía es directamente proporcional al aumento de refuerzo de fibra que posee el espécimen. Para las probetas sin refuerzo, la capacidad de absorber energía es casi nula, tal y como se puede observar en las Figuras 5-16 y 5-17, de las cuales tales datos se pueden ratificar en la Tabla 5-7. Al comparar la cantidad de energía absorbida entre ambas mezclas se puede destacar lo siguiente, en la mezcla de árido fino, se presenta una mayor capacidad de energía post-fisuración excepto en el ensayo de compresión, en donde la cantidad de energía absorbida es mayor para la mezcla de árido grueso. La diferencia de estos datos no es sustancialmente diferente, por ello se puede atribuir que el refuerzo de fibra funciona de forma similar en ambas mezclas.

6 Conclusión

En el presente trabajo de investigación, el cual tenía como objetivo estudiar el comportamiento que posee el hormigón al incorporar fibras de PVA tanto largas de 30 [mm] en un 70% como cortas de 12 [mm] en un 30%, se logra cumplir el objetivo presentado, en donde se analiza y estudia el comportamiento que este posee en cada ensayo realizado, compresión, tracción directa y flexión, en busca de una mejora en el comportamiento del hormigón respecto a la ductilidad y resistencia.

En el ensayo a tracción y compresión, se realizaron 18 probetas cilíndricas por cada uno, de dos tipos de mezclas, M1 quien presenta árido grueso con tamaño máximo de 19 [mm] y M2 quien posee árido fino con tamaño máximo de partícula de 4.7 [mm], en donde se tiene 3 diferentes dosificaciones de fibra, 0%, 1.23% y 2%, para cada mezcla, correspondiendo a un total de 12 ensayos realizados, quedando 6 probetas de repuestos, puesto que para cada dosificación se ensayan 2 probetas para corroborar similitud entre estos mismos junto con las probetas de reserva en caso de una falla externa al ensayo. Con respecto al ensayo de flexión se realizan la misma cantidad de ensayos con moldes prismáticos, viguetas, de dimensiones 15 [cm] de alto, 15 [cm] de ancho y 53 [cm] de largo, con la diferencia que se consideraron 12 viguetas, dejando exenta las de reserva.

Acorde a la investigado, la función principal de la fibra como refuerzo es aumentar la ductilidad y resistencia a la tracción del hormigón, los resultados mostraron una clara mejora en estos aspectos, tanto para la mezcla de árido grueso como árido fino, en los tres tipos de ensayos realizados se mostró una mejora tanto en la resistencia máxima del hormigón como un comportamiento dúctil que se ve representado en la etapa post-peak de las curvas esfuerzo-deformación.

Frente a los resultados obtenidos en los ensayos a tracción en ambas mezclas el óptimo se logra en los especímenes con 2% de PVA, logrando un incremento con respecto a las probetas sin refuerzo de un 20.1% para M1 y de un 57.1% en M2, obteniendo un aumento mayor para la segunda mezcla, sin embargo, ambos valores son similares, es decir, para M1 la resistencia máxima que posee es de

2.55 [MPa] y para M2 corresponde a 2.65 [MPa], de este modo se obtiene que el hormigón reforzado aumenta su tensión máxima a tracción obteniendo resultados similares en ambas mezclas, por otro lado, el comportamiento post-peak es claramente dúctil mejorando su comportamiento en ambas mezclas al aumentar la cantidad de fibra como refuerzo en donde la deformación última presente al 80% de su tensión máxima es 48.6 veces mayor en la mezcla M1-2% y 69 veces mayor en la mezcla M2-2%, mostrando un mejora mayor para las probetas de árido fino. En los datos, se obtiene que la deformación última para cada uno es de 1.5 [mm] y 1.84 [mm] respectivamente. De este modo se logra destacar lo siguiente, un refuerzo del 2% de fibra de PVA logra obtener un valor similar en la resistencia del hormigón en ambas mezclas, del mismo modo, el comportamiento dúctil que poseen, tanto para las probetas con árido fino y árido grueso, es casi idéntico. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos a tracción en ensayos anteriores, la fibra de PVA corta logra aportar beneficios principalmente a la mezcla de árido fino, no así con la que posee árido grueso, es por ello que se logra destacar que el uso de

fibra larga dentro de la mezcla en conjunto con la fibra de PVA de 12 [mm], logra un comportamiento equiparable entre mezclas de árido grueso y fino.

Con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos a compresión, tomando en cuenta los datos de la mezcla M1, tienden a ser consistentes con respecto al comportamiento que poseen en los ensayos a tracción, es decir, presentar un aumento directamente proporcional al refuerzo de fibra que posee la mezcla tomando en consideración un incremento porcentual del 23.24% considerando el óptimo de M1-2% respecto a su similar sin refuerzo. Por otro lado, para la mezcla M2 el óptimo de la tensión máxima se consiguen para los especímenes reforzados con 1.23%, lo que difiere del comportamiento esperado. Considerando el comportamiento dúctil, en ambos casos, el refuerzo de fibra logra atribuir esta respuesta, para la mezcla M1, se presenta un decaimiento en la curva más prologado en los especímenes reforzados con fibra de 1.23%, sin embargo, para la mezcla de M2 este decaimiento prolongado se observa más acentuado en los especímenes con refuerzo de fibra de 2%. Finalmente se destaca que para la mezcla 2, se observa un aumento en la resistencia máxima tomando un óptimo en las probetas con 2% de refuerzo y una respuesta mayormente dúctil en los especímenes con 1.23% de PVA, por otro lado, para la mezcla M2, el óptimo en la resistencia máxima se consigue para las probetas con 1.23% de refuerzo la mejor respuesta dúctil lo poseen los especímenes con 2% de fibra. Sin embargo, en términos de resultados numéricos, la mejor respuesta la posee la mezcla con árido grueso, en 2% con tensión máxima y 1.23% en deformación última.

Frente a los ensayos de flexión, se obtuvo una respuesta dúctil post-peak en la curva esfuerzo-deflexión, junto con aumentos en la resistencia máxima de los especímenes con refuerzo de fibra. En ambos casos, tanto para la mezcla de árido grueso como la de árido fino, el aumento de la tensión máxima es directamente proporcional al aumento de refuerzo de fibra presente en la matriz, presentando un aumento porcentual en M1-2% 59.34% respecto al hormigón sin refuerzo y por otro lado en M2-2% este aumento es del 39.43% en comparación a los especímenes sin refuerzo de fibra. Con respecto al comportamiento dúctil de ambas mezclas, en ambos casos esta respuesta mejora a medida que se aumenta el refuerzo de fibra. En donde el aumento de las deformaciones últimas corresponde a 20 veces más en M1-2% respecto a su similar sin refuerzo y de 27.2 veces más en M2-2% respecto a M2-0%. Se destaca que la mezcla de árido fino posee una mejor respuesta a las deformaciones, logrando un valor de deformación última de 5.107 [mm] en comparación a la mezcla de árido fino que data de un valor de 3.793 [mm], ambos considerando como valor último al 80% de degradación, por otro lado, la mezcla de árido grueso, logra una resistencia máxima mayor respecto a la mezcla M2, con un valor de 4.86 [MPa] para M1 y 4.39 [MPa] para la mezcla de árido fino.

Finalmente se destaca lo siguiente, los objetivos son cumplidos logrando resultados que mejoran el comportamiento frente a las deformaciones, es decir una mejor respuesta dúctil del hormigón, junto con un incremento en la resistencia máxima que posee este. Por otro lado, se logra concluir que la mezcla de fibra, considerando un 30% de fibra corta de 12 [mm] con un 70% de fibra larga de 30 [mm], provoca respuestas similares en ambas mezclas con diferencias leves que logran favorecer tanto a la mezcla de árido grueso en algunos casos como a la de árido fino, y gracias a esto, se logra demostrar que la adición de fibra larga dentro de la matriz cementosa es favorable junto con un mayor tamaño de árido. Por otro lado, se puede destacar que una combinación de fibras largas y cortas logra presentar una respuesta similar entre las mezclas, equiparando los resultados entre mezclas con árido grueso y árido fino. Por último, queda abierto el estudio del comportamiento del hormigón con refuerzo de mezclas de PVA en ensayos con vigas, muros y losas, analizar si la respuesta que se podría obtener en tales ensayos son coincidentes con los

obtenidos en este trabajo, por otro lado, se podría caracterizar hormigón con 100% de fibra de PVA larga, de esta forma se podría corroborar si la fibra larga posee un mejor comportamiento junto al árido grueso, en contraste con la mezcla de árido fino y como a manera de investigación y solución de un problema, se puede buscar la forma de industrializar el hormigón con fibra, de esta forma lograr hacer grandes cantidad de mezclas para lo que respecta a elementos estructurales.

7 Bibliografía

A. Allahverdi, K. Kianpur and M. R. Moghbeli, EFFECT OF POLYVINYL ALCOHOL ON FLEXURAL STRENGTH AND SOME IMPORTANT PHYSICAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT PASTE, Iranian Journal of Material Science Engineering Vol. 7, Number 1, Winter 2010.

Committe ACI 544 (1996), “State-of-art report on fiber reinforced concrete”, Reapproved 2009

Arenas, A. (2021). Caracterización de la respuesta a tracción de hormigón reforzado con fibras de PVA. Universidad de Chile.

Medeiros, A. (2012). Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras (Tesis Doctoral, Pontificia Universidade Católica Do Rio De Janeiro).

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M., Concrete: Microstructure, properties and materials, 3rd Ed., McGraw-Hill. 2006.

Sasmal, S. and Avinash, G., Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers., Construction and Building Materials, 128:136–147. 2006

Sadaqat Ullah Khan, Tehmina Ayub, Modelling of the pre and post-cracking response of the PVA fibre reinforced concrete subjected to direct tension, Construction and Building Materials 120 (2016) 540–557.

Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, Toney Cummins, Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers, Construction and Building Materials 24 (2010) 2285–2293.

A. NOUSHINI; B. SAMALI; K. VESSALAS, INFLUENCE OF POLYVINYL ALCOHOL FIBRE ADDITION ON FRESH AND HARDENED PROPERTIES OF CONCRETE, Conference Paper · September 2013

Reveco, J. (2021). Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA. Universidad de Chile.

Redon, C., Li, VC, Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. Ogawa, A., Measuring and modifying interface properties of pva fibers in ECC matrix., Journal of materials en civil engineering, 399 – 406. 2001

McCormac, J. C., y Brown, R. H. (2017). Diseño de concreto reforzado (10.a ed.). AlfaomegaArthur

Bentur, A., y Mindess, S. (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites (Second ed.). Taylor and Francis

Ayub, T., Khan, S. U., and Ayub, A., Analytical model for the compressive stress–strain behavior of PVA-FRC, *Construction and Building Materials*, 214:581–593., 2019

Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan (2017), “*Design of Concrete Structures*” 14th Edition – Chapter 1.1.

Mathworks, Soporte (Centro de ayuda), <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html>.

Anexos

Anexo A

Calibración de los sensores LVDT

A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la calibración de los sensores LVDT de alta precisión utilizados para medir las deformaciones en los ensayos. Estos sensores miden el voltaje a través del deslizamiento del núcleo dentro del elemento cilíndrico, logrando su máxima presión en un rango que permita mover la varilla en sus términos medios.

Para efectos de la calibración, se toma el casquete del sensor fijándolo en un punto con una regla en una superficie nivelada y homogénea, luego se mueve este núcleo en rangos de 1 cm abarcando la longitud completa del casquete, tomando sentidos hacia el interior y hacia el exterior. De este modo se obtiene los gráficos que se presentarán a continuación de las lecturas obtenidas.

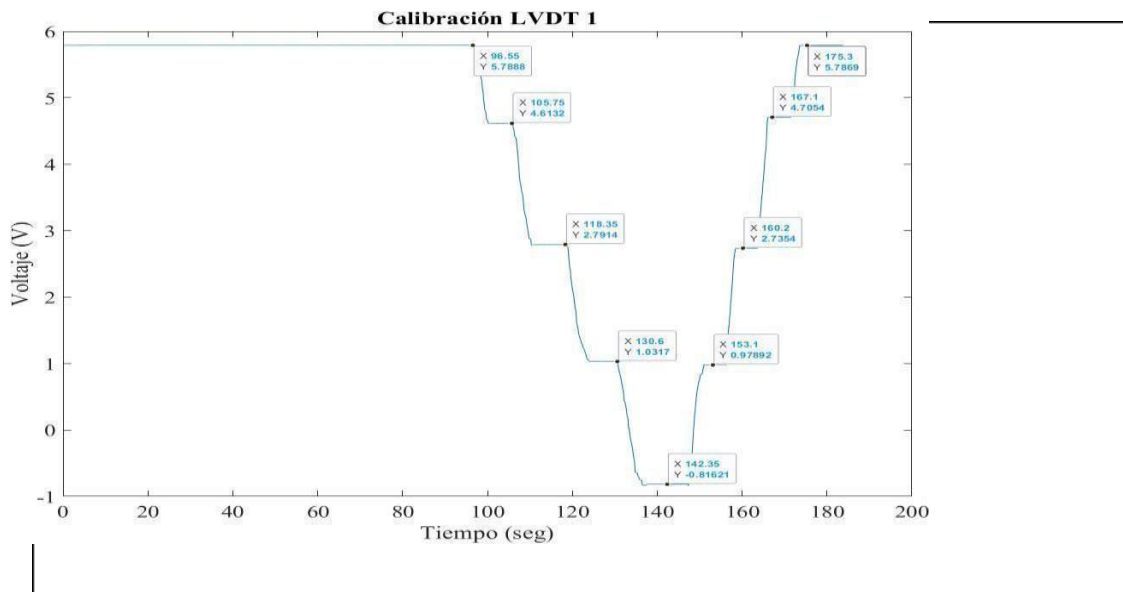


Figura 0-1 Lectura 1 – LVDT 1

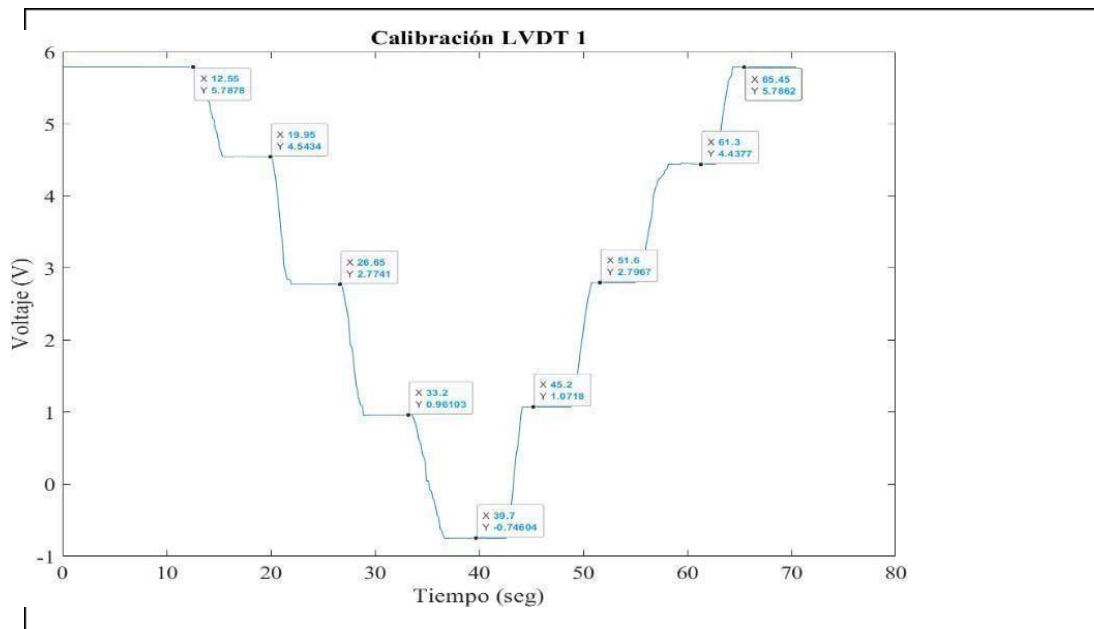


Figura 0-2 Lectura 2 – LVDT 1

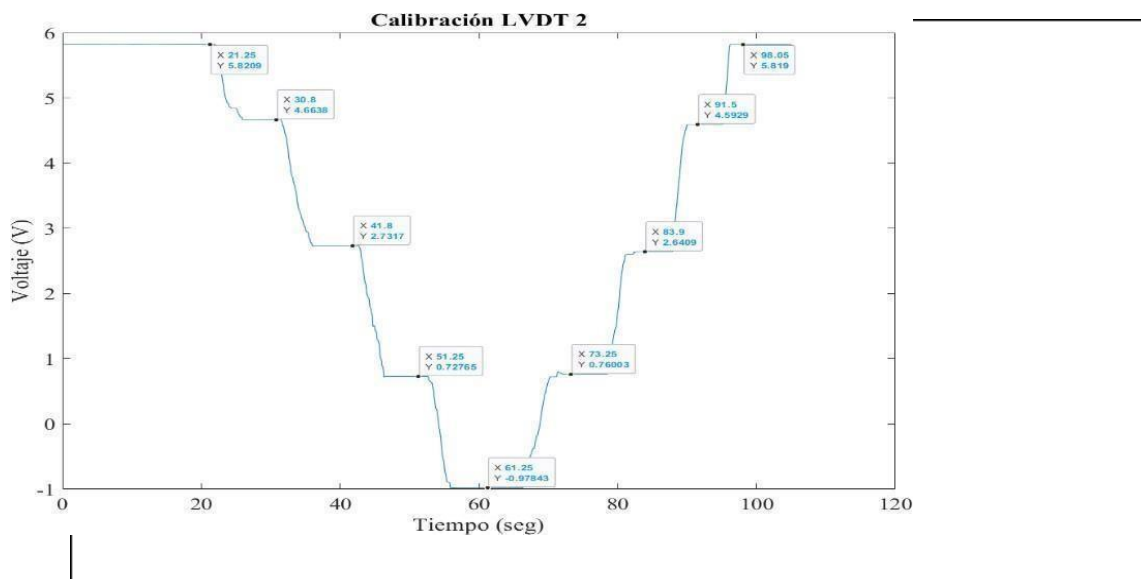


Figura 0-3 Lectura 1 – LVDT 2

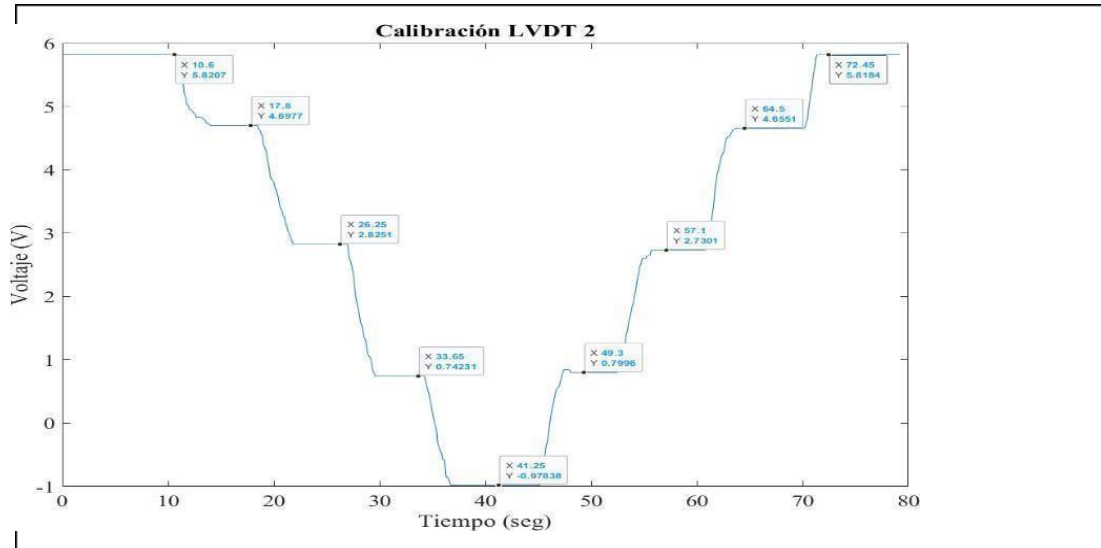


Figura 0-4 Lectura 2 – LVDT 2

A continuación, se presentan las tablas de los datos obtenidos de la calibración de ambos sensores LVDT.

Tabla 0-1 Puntos de Calibración LVDT 1

LVDT 1.1			LVDT 1.2		
V	mm	Pendiente [mm/V]	V	mm	Pendiente [mm/V]
5.788	0	8.506	5.787	0	8.036
4.613	10	5.489	4.543	10	5.652
2.791	20	5.682	2.774	20	5.515
1.031	30	5.411	0.961	30	5.858
-0.816	40		-0.746	40	
-0.816	40	5.570	-0.746	40	5.501
0.978	30	5.693	1.071	30	5.797
2.735	20	5.076	2.796	20	6.093
4.705	10	9.246	4.437	10	7.415
5.786	0		5.786	0	
Promedio		5.487	Promedio		5.736

Tabla 0-2 Puntos de Calibración LVDT 2

LVDT 2.1			LVDT 2.2		
V	mm	Pendiente [mm/V]	V	mm	Pendiente [mm/V]
5.820	0	8.642	5.820	0	8.904
4.663	10	5.175	4.697	10	5.340
2.731	20	4.989	2.825	20	4.801
0.727	30	5.861	0.742	30	5.811
-0.978	40		-0.978	40	
-0.978	40	5.752	-0.978	40	5.624
0.760	30	5.316	0.799	30	5.180
2.641	20	5.123	2.730	20	5.194
4.593	10	8.155	4.655	10	8.596
5.819	0		5.818	0	
Promedio		5.370	Promedio		5.325

Anexo B

Cálculo Energía Post-fisuración

Para el cálculo de energía post-fisuración se determina el área bajo la curva hasta cierto punto que depende del ensayo, en el caso de tracción directa es hasta el 80% de degradación, en compresión al 65% de degradación y finalmente para el ensayo a flexión este corresponde hasta el FR_4 .

Para ello se toma una función en MATLAB llamada TRAPZ el cual realiza una integración numérica a través del método trapezoidal, el cual consiste en dividir el área a integrar en trapecios, de esta forma su cálculo es más fácil (Figura 8-5) **Mathworks, Soporte (Centro de ayuda)** .

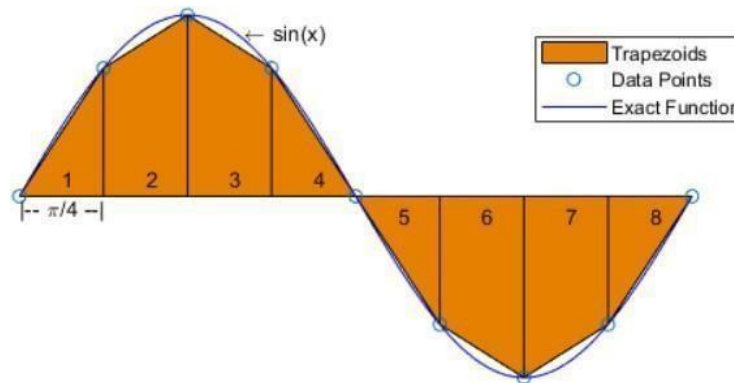


Figura 0-5 Ejemplo gráfico de la función TRAPZ. Mathworks, Soporte (Centro de ayuda)

Cabe destacar que antes de realizar tal función se debe reordenar los puntos del eje axial de tal forma que se presente ascendentemente, de este modo se evitan errores que puedan afectar a la función, por otro lado, este cálculo subestima el valor determinado, dado que se consideran trapecios bajo la curva.

```
pos = find(abs(y1 - young*max(y1)) < 0.1,1,'first');
pos_peak = find(abs(y1 - max(y1)) < 0.000001,1,'first');

pos_peak = find(abs(y2 - max(y2)) < 0.000001,1,'first');
J1 = trapz(x2(pos_peak:length(x2)).*L0_uni,y2(pos_peak:length(y2)).*A)/1000;
```

Figura 0-6 Código MATLAB para el cálculo de energía