



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

# **CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA A TRACCIÓN DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE PVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ALEJANDRO ARENAS VALDÉS

**PROFESOR GUÍA:**

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

FABIÁN ROJAS BARRALES

AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: ALEJANDRO ARENAS VALDÉS  
FECHA: SEPTIEMBRE 2021  
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE S.

## **CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA A TRACCIÓN DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE PVA**

Debido a la importancia que tiene el hormigón en el ámbito estructural, es necesario mejorar ciertas características deficientes que posee este material, como, por ejemplo, la ductilidad y fragilidad. Se han realizado diversas investigaciones en donde se utiliza la fibra de PVA (Alcohol de Polivinilo) como refuerzo en el hormigón, pero la mayoría de estas corresponde a morteros especiales. Debido a esto, se decide realizar un estudio del efecto producido por la adición de fibras de PVA dentro de un hormigón común. En el siguiente documento se presenta un análisis de la respuesta a tracción del hormigón reforzado con 0%, 1.23% y 2% de fibra de PVA. Además, con el fin de analizar el comportamiento de la fibra, se confeccionan tres tipos de mezcla, una de árido grueso (tamaño máximo 19 mm), otra de árido intermedio (tamaño máximo 9.5 mm) y una de árido fino (tamaño máximo 0.6 mm). Para esto, se confeccionan deferentes probetas que serán ensayadas a tracción directa, compresión y flexión, además de cuatro vigas de hormigón armado, que serán ensayadas a flexión y analizadas mediante fotogrametría. Durante la primera etapa, se realizaron ensayos de prueba a tracción directa, con el fin de establecer un montaje definitivo, ya que las piezas del ensayo eran nuevas. Luego de tener datos consistentes, se procede a realizar los ensayos oficiales de tracción, compresión y flexión. Los resultados arrojaron que la adición de fibra a la matriz de hormigón aumenta la ductilidad del material, sobre todo en muestras de árido fino. En cuanto a las tensiones máximas a tracción, estas son mayores en las probetas con fibra para las mezclas de árido intermedio y fino, superando en un 50% y en más del doble, respectivamente, a las muestras sin fibra. Lo mismo ocurre en el ensayo a flexión para estas mismas mezclas, aumentando la carga en un 60% y 85% respectivamente, debido a la adición de fibras. En el caso de la mezcla de árido grueso, si bien resiste tensiones mayores en comparación a las otras mezclas, estas no se ven con grandes alteraciones debido a la adición de fibras. Con respecto al ensayo de vigas de hormigón armado, hechas con la mezcla de árido grueso, en las vigas de menor tamaño, diseñadas a fallar por corte, se produjo un fenómeno importante, ya que la viga con 2% de fibra cambio su modo de falla a flexión, mejorando sustancialmente su ductilidad. En el caso de las vigas largas, la viga con 2% de fibra de PVA obtuvo prácticamente la misma deflexión, resistencia máxima y cantidad de grietas que la viga sin fibra. Si se observaron mayores deformaciones longitudinales en la viga con presencia de fibras.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a todas las personas que me ayudaron durante el desarrollo de mi memoria, comenzando por el profesor Leonardo Massone, que me dio la oportunidad de trabajar con él y poder realizar esta investigación, además de siempre estar atento a cualquier duda. También agradecer a Jaime por ayudarme y enseñarme todo sobre el proceso de realización de mezclas y probetas. Gracias a Catalina, Omar, Mario, profesor Pedro Soto, Víctor y Juan quienes me ayudaron durante la confección de probetas y la realización de ensayos, todos ellos grandes personas y sin su ayuda esta memoria no podría haberse llevado a cabo.

Agradecer a mis grandes amistades que logre encontrar en la facultad y me acompañaron durante todos estos años, estudiando (a veces), riendo, celebrando y también sufriendo. Gracias a Karla, Eduardo, Sebastián, Andrés, Miguel y Cata, sin duda lo mejor que me dio la universidad. También agradecer a mis amigos de la vida, Nicolas (Negro), Nicolas (Mario) y Camila, que me acompañan desde hace muchos años, dándome apoyo, consejos de vida y momentos inolvidables.

Agradecer a Ichien por ser la mejor polola del mundo durante estos 3 años, que siempre ha creído en mí, ha hecho que este proceso sea menos estresante y espero tener su compañía por muchos años más.

Finalmente agradecer a mi familia, tías, tíos, primos, y por sobre todo a mis padres, Patricia y Alejandro, y a mi hermana Patricia, por su ayuda incondicional desde que era pequeño, por sus consejos y por darme un buen vivir, sin ellos no podría haber llegado a esta instancia. Y también a mis mascotas Tobías y Aurelio, que me alegran los días y se portan muy mal.

# Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo principal .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcances .....	2
1.4. Estructura de la memoria .....	3
2. Revisión bibliográfica .....	4
2.1. Propiedades del hormigón .....	4
2.2. Propiedades de las fibras para refuerzo .....	5
2.3. Comportamiento del hormigón reforzado con fibras .....	7
2.4. Forma de probeta y velocidad de deformación .....	13
2.5. Efecto del tamaño máximo de árido .....	14
2.6. Análisis mediante fotogrametría .....	16
3. Metodología Experimental .....	18
3.1. Materiales utilizados .....	18
3.1.1. Fibra de PVA .....	18
3.1.2. Áridos .....	19
3.1.3. Acero de refuerzo .....	22
3.2. Preparación de mezclas .....	23
3.2.1. Procedimiento .....	23
3.2.2. Tipos de mezclas y dosificación .....	26
3.2.3. Probetas .....	27
3.3. Descripción de ensayos .....	28
3.3.1. Preparación de probetas .....	28
3.3.2. Dispositivos de ensayo a tracción directa .....	29
3.3.3. Ensayo de compresión .....	31
3.3.4. Ensayo de flexión en vigas con armadura .....	32
3.3.5. Resumen de probetas fabricadas .....	33
4. Resultados y Análisis .....	36
4.1. Ensayos a tracción directa .....	36
4.1.1. Pruebas preliminares .....	36

4.1.2. Resultados ensayos a tracción directa.....	38
4.2. Resultados ensayos a compresión.....	42
4.3. Resultados ensayos a flexión de viguetas.....	45
4.4. Análisis de resultados entre ensayos.....	50
4.5. Resultados ensayos a flexión en vigas reforzadas con acero.....	52
4.5.1. Resultados sensor ultrasónico.....	53
4.5.2. Resultados análisis por fotogrametría.....	55
5. Conclusiones.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO.....	72
A. Granulometría de áridos.....	72
B. Dispositivos a tracción y flexión.....	75
B.1. Ensayo a tracción.....	75
B.2. Ensayo a Flexión.....	77
C. Resultados pruebas preliminares.....	80
C.1. Ensayo de tracción directa.....	80
D. Metodología del programa Ncorr para fotogrametría.....	82

## Índice de Tablas

Tabla 2.1: Tipos de fibras y sus propiedades [16].	5
Tabla 2.2: Resultados de las propiedades del hormigón fresco [18].	12
Tabla 3.1: Materiales usados para mezcla de hormigón.	18
Tabla 3.2: Propiedades de la fibra de PVA KURALON™ REC 15/12 mm.	19
Tabla 3.3: Tamaño de apertura según tamiz.	20
Tabla 3.4: Resultados análisis granulométrico.	21
Tabla 3.5: Resultados de las propiedades mecánicas del acero ensayado.	22
Tabla 3.6: Dimensiones de moldes.	24
Tabla 3.7: Dosificaciones de mezclas.	26
Tabla 3.8: Cantidad de probetas cilíndricas.	27
Tabla 3.9: Cantidad de viguetas prismáticas.	27
Tabla 3.10: Cantidad de Vigas de hormigón armado (M1).	28
Tabla 3.11: Probetas cilíndricas.	34
Tabla 3.12: Probetas cilíndricas (continuación).	34
Tabla 3.13: Viguetas prismáticas.	35
Tabla 3.14: Vigas de hormigón armado.	35
Tabla 4.1: Resultados ensayos a tracción directa.	39
Tabla 4.2: Resultados de ensayos a compresión.	43
Tabla 4.3: Resultados ensayos a flexión en viguetas.	46
Tabla 4.4: Resultados promedio de tensiones máximas por cada tipo de muestra.	50
Tabla 4.5: Comparación de tensiones experimentales y teóricos de la tensión a flexión.	52
Tabla 4.6: Resultado ensayos a compresión.	53
Tabla 4.7: Cargas teóricas de agrietamiento y máxima.	54
Tabla 4.8: Parámetros a configurar para el análisis DIC.	56
Tabla 4.9: Resultados error asociado al desplazamiento.	56
Tabla 4.10: Resultados error asociado a la deformación.	57
Tabla 4.11: Configuración software DSLR Remote Pro Multi-Camera	58
Tabla 4.12: Deformaciones horizontales Viga Corta	60
Tabla 4.13: Deformaciones horizontales Viga Larga.	60
Tabla A.1: Resultados granulometría arena fina A.	72
Tabla A.2: Resultados granulometría arena fina B.	73
Tabla A.3: Resultados granulometría arena gruesa.	73
Tabla A.4: Resultados granulometría gravilla.	74
Tabla C.1: Resultados pruebas preliminares de ensayos a tracción directa.	80

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Gráfico de Esfuerzo-Deformación para el hormigón.....	4
Figura 2.2: Curva de ensayo "pull-out" [21]. .....	6
Figura 2.3: Ensayo Pull-out para fibras (a) no aceitadas y (b) aceitadas [21]. .....	7
Figura 2.4: Comportamiento del hormigón reforzado con fibras bajo tensión directa [5]. .....	8
Figura 2.5: Comparación de la respuesta a tensión directa con diferentes tipos de fibras [13]. ....	8
Figura 2.6: Resultados ensayo a compresión de FRC con fibra de PVA (0%, 1%, 2% y 3% de volumen) [3]. .....	9
Figura 2.7: Resultados de ensayo a compresión realizado por Reveco (2020) para muestras con fibra de PVA tipo REC 15/12 mm [22]. .....	10
Figura 2.8: Comportamiento a flexión de ECC con cuantías de fibras de PVA de (a) 1% y (b) 2% [26]. .....	10
Figura 2.9: Efecto de puente a través de la grieta [26]. .....	11
Figura 2.10: Respuesta a la flexión según la relación PVA/cemento [2]. .....	11
Figura 2.11: Agrietamiento múltiple usando fibras de PVA (a) y polipropileno (b) [19]. .....	12
Figura 2.12: Forma típica probeta "hueso de perro". .....	13
Figura 2.13: Curvas tensión-deformación para especímenes en forma de "hueso de perro" y cilíndricos [11]. .....	13
Figura 2.14: Curvas tensión-deformación de PVA-ECC para diferentes tasas de deformación [7]. .....	14
Figura 2.15: Tenacidad a la fractura según tamaño de árido para ECC [24]. .....	15
Figura 2.16: Efecto de geometría de las partículas de agregado [23]. .....	16
Figura 2.17: Deformaciones verticales ( $\epsilon_{yy}$ ) obtenidas del programa Ncorr: a) Sentido positivo; b) Sentido negativo [15]. .....	17
Figura 3.1: Fibra de PVA KURALON™ REC 15/12 mm. ....	19
Figura 3.2: Tamiz ASTM. ....	20
Figura 3.3: Curvas granulométricas los áridos utilizados. ....	21
Figura 3.4: Montaje del ensayo a tracción para una barra de acero. ....	22
Figura 3.5: Curva tensión-deformación barra de acero $\phi 8$ . ....	23
Figura 3.6: Herramientas usadas para preparación de mezcla. ....	24
Figura 3.7: Moldes utilizados para confección de probetas. ....	25
Figura 3.8: (a) Probeta no refrentada, (b) Probeta refrentada. ....	28
Figura 3.9: Montaje ensayo a tracción directa. ....	29
Figura 3.10: Dispositivo montado para el ensayo a flexión de viguetas. ....	30
Figura 3.11: Esquema del ensayo a flexión de viguetas. ....	31
Figura 3.12: Montaje ensayo a compresión. ....	31
Figura 3.13: Montaje ensayo a flexión de vigas con armadura de acero. ....	32
Figura 3.14: Detalle Viga Corta. ....	32
Figura 3.15: Detalle viga larga. ....	33
Figura 4.1: Falla en el extremo (a), falla esperada y cantidad de epóxico (b) y presencia de hormigón en fallas en los bordes (c). .....	37
Figura 4.2: Disposición de los sensores LVDT: Montaje de prueba (a) y montaje definitivo (b). .....	38
Figura 4.3: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido grueso M1. ....	40
Figura 4.4: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido intermedio M2. ....	40

Figura 4.5: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido fino M3.....	41
Figura 4.6: Distribución de la fibra dentro de la matriz de hormigón para (a) M1, (b) M2 y (c) M3. .....	42
Figura 4.7: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido grueso M1.....	43
Figura 4.8: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido intermedio M2. ....	44
Figura 4.9: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido fino M3.....	44
Figura 4.10: Modo de falla de probetas en ensayo a compresión.....	45
Figura 4.11: Montaje sensor LVDT. ....	46
Figura 4.12: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido grueso M1. ....	47
Figura 4.13: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido intermedio M2. ....	47
Figura 4.14: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido fino M3. ....	48
Figura 4.15: Efecto de puente dentro de la grieta vista por (a) debajo y (b) por un costado de la vigueta. ....	49
Figura 4.16: Formación de grietas en las muestras. ....	50
Figura 4.17: Comparación del promedio de tensiones máximas obtenidas en cada ensayo según el volumen de fibra en (a) M1, (b) M2 y (c) M3.....	51
Figura 4.18: Curvas tensión-deformación de ensayos a compresión. ....	53
Figura 4.19: Curva ensayo a flexión vigas cortas. (ultrasonido).....	54
Figura 4.20: Curva ensayo a flexión vigas largas. (ultrasonido).....	55
Figura 4.21: Campo de deformaciones entregados por Ncorr (dirección vertical). ....	57
Figura 4.22: Curva carga-deflexión Viga corta (Ncorr).....	58
Figura 4.23: Curva carga-deflexión Viga larga (Ncorr).....	59
Figura 4.24: Deformación $\epsilon_{xx}$ en VC-SF.....	60
Figura 4.25: Deformación $\epsilon_{xx}$ en VC-2%.....	61
Figura 4.26: Deformación $\epsilon_{xx}$ en VL-SF. ....	61
Figura 4.27: Deformación $\epsilon_{xx}$ en VL-2%. ....	62
Figura 4.28: Estado final de Vigas Cortas.....	63
Figura 4.29: Vigas cortas ensayadas por Reveco [22].....	63
Figura 4.30: Estado final viga VL-SF. ....	63
Figura 4.31: Estado final viga VL-2%.....	64
Figura 4.32: Comparación de resultados Vigas Cortas (Ultrasonido y Ncorr). ....	64
Figura 4.33: Comparación de resultados Vigas Largas (Ultrasonido y Ncorr).....	65
Figura B.1: Placa utilizada anteriormente en ensayos de tracción. ....	75
Figura B.2: Detalle de piezas del dispositivo a tracción. ....	76
Figura B.3: Disposición del ensamblaje de piezas. ....	77
Figura B.4: Dispositivo a flexión ensamblado. ....	78
Figura B.5: Detalle de piezas dispositivo a flexión.....	79
Figura C.1: Ensayo de probeta M2-1.23%-1.....	81
Figura D.1: Pestaña principal del programa Ncorr.....	82
Figura D.2: Pestaña principal con imágenes cargadas. ....	82
Figura D.3: Pestaña para establecer la ROI.....	83
Figura D.4: Parámetros a configurar para el análisis DIC.....	84
Figura D.5: Colocación de "semillas". ....	85
Figura D.6: Definir parámetros de desplazamiento.....	85
Figura D.7: Cálculo de deformaciones.....	86



# PRIMER CAPÍTULO

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

El hormigón corresponde a uno de los materiales más usados en el área de la construcción, sobre todo en nuestro país, y se caracteriza por su gran resistencia a la compresión, pero también por una resistencia a la tracción muy baja. Además, es un material muy frágil y tiende a quebrarse muy fácilmente sin generar una respuesta dúctil, solo llegando a soportar pequeñas deformaciones. Debido a esto, es necesario agregar otras componentes al material como barras de acero o fibras para poder soportar los esfuerzos y generar una mayor ductilidad en el material.

El uso de fibras en materiales de construcción data de la antigüedad donde se utilizaba paja o pelo de crin de caballo para mejorar las propiedades de las estructuras de la época [30]. Actualmente, con los avances tecnológicos en la industria de la construcción se han desarrollado fibras más resistentes con diferentes materiales sintéticos o metálicos, tales como: polipropileno, polietileno, acero y carbono, que son las más usadas, dando origen a un nuevo compuesto a base de mortero denominado Compuesto Cementoso de Ingeniería (ECC), diseñados en base a la teoría micromecánica, creados principalmente para mejorar la ductilidad, usando fibras sintéticas, minerales y áridos muy finos, convirtiéndolo en un material altamente duradero y amigable con el medio ambiente. Los ECC pueden llegar a tener una capacidad de deformación de 300 a 500 veces mayor que un hormigón común, una resistencia a compresión de 150 (MPa) y una resistencia a tracción de 20 (MPa).

El principal aporte de la adición de fibras a la matriz de hormigón no es el aumento de resistencia, sino que, en la respuesta posterior a la fisuración, en donde las fibras generan un efecto de puente a través de la zona de falla. En Chile, se usan fibras desde los años 70, principalmente en el diseño de pavimentos lo que ayuda a disminuir el espesor de estos y el agrietamiento. El material más usado en Chile es la fibra de polipropileno [9].

Se ha encontrado un material que ayuda a mejorar la ductilidad en el hormigón, y también su resistencia [13], [12]. Este material es el Alcohol de Polivinilo (PVA), que es un polímero sintético de módulo de elasticidad alto, soluble en agua, tiene una alta resistencia y flexibilidad, no es tóxico y es resistente a aceites, grasas y disolventes. Se ha demostrado que este tipo de fibra logra mejores resultados en el hormigón que otros materiales como el polipropileno o polietileno [14], ya que su naturaleza hidrófila permite generar enlaces más fuertes con la matriz de cemento [21], lo que ayuda a prevenir la aparición de peligrosas grietas en el hormigón.

La adición de fibra a la matriz de concreto a condicionado el uso de agregado grueso, material muy importante en el hormigón, ya que diferentes propiedades del concreto dependen de la dosificación del agregado. En algunos estudios se ha demostrado que el rendimiento de las fibras dentro de la matriz de concreto mejora sustancialmente con el uso de áridos muy finos [23], [24]. Es por esto por lo que los ECC generalmente se fabrican utilizando áridos de tamaño máximo de 1 (mm).

Hoy en día, no existen demasiados estudios que definan el comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras y la mayoría de las investigaciones tratan sobre el comportamiento de los ECC, dejando a un lado el análisis del uso de fibras en hormigón con áridos gruesos. Por estas razones, este estudio pretende analizar el comportamiento de un hormigón común reforzado con fibras de PVA, tomando en cuenta diferentes tamaños máximos de agregado grueso. Se espera generar un incentivo en el área de la construcción acerca del uso de la fibra de PVA como refuerzo en el hormigón.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo principal**

El objetivo principal de esta memoria es estudiar experimentalmente la respuesta a tracción de hormigón reforzado con fibras de PVA y analizar el aporte producido por la fibra en cuanto a ductilidad y resistencia.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Como objetivos específicos tenemos los siguientes:

- Hacer una comparación de la curva de Tensión-Deformación de un hormigón con diferentes cuantías de fibras de PVA.
- Analizar la efectividad de las fibras de PVA para diferentes tamaños de árido en la mezcla de hormigón.
- Observar y analizar las deformaciones presentes en vigas mediante el uso de fotogrametría.

## **1.3. Alcances**

Esta memoria, perteneciente al área de la ingeniería civil estructural, se centrará en el estudio del hormigón reforzado con fibras de PVA. Para esto se realizarán dos ensayos: Tracción directa y Flexión, tanto para probetas cilíndricas, prismáticas y vigas de hormigón armado. Estos ensayos son realizados en una maquina universal, junto con dispositivos para medir el desplazamiento (LVDT). Se ira variando la cuantía de fibras dentro de la mezcla (0%, 1.23% y 2%) y también el tamaño máximo de árido realizando tres tipos de muestra mezclando gravilla, arena gruesa y arena fina. Se realizarán análisis de diferentes propiedades del hormigón, como resistencia y ductilidad, utilizando gráficos y tablas de comparación, para que sea mucho más fácil la comprensión y discusión de resultados, y obtener conclusiones que sean acordes a lo estudiado en la bibliografía.

## **1.4. Estructura de la memoria**

Esta memoria contiene un total de 5 capítulos, incluyendo el capítulo inicial de introducción, objetivos principales y secundarios, y alcances del tema a investigar.

En el capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica centrada principalmente en las propiedades mecánicas del hormigón, propiedades de la fibra de PVA y el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de PVA. La mayoría de la documentación consultada corresponde a investigaciones sobre ECC y su comportamiento a tracción, además de comparaciones entre diferentes tipos de fibras usadas como refuerzo para concreto. El objetivo de este capítulo es de entregar la información suficiente al lector para que se familiarice con el tema, a través de datos concretos relacionados con la investigación desarrollada en esta memoria.

Luego, en el capítulo 3, se describe la metodología experimental que se llevó a cabo para la realización de esta investigación. Se explica detalladamente el proceso de confección de probetas, se describen los materiales utilizados y las dosificaciones de las diferentes mezclas realizadas. Además, se describen los ensayos que se realizan en esta investigación y se explican algunas decisiones tomadas a lo largo de este proceso anterior a la toma de ensayos.

Posteriormente, en el capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados, que son presentados en tablas y gráficos, de una forma ordenada para que sea fácil comprenderlos. Además, se realiza un análisis de estos resultados y se discute acerca de estos datos obtenidos, con el fin de evaluar la efectividad de la fibra de PVA agregada en el hormigón, tanto en la ductilidad como en su resistencia.

Finalmente, en el capítulo 5, se establecen las conclusiones de esta investigación, presentándolas de manera ordenada y detallada, según lo discutido en capítulos anteriores. Se comprueba que los objetivos descritos en el primer capítulo se hayan cumplido, realizando comparaciones entre lo revisado en bibliografía y lo obtenido experimentalmente. Se entregan recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con la fibra de PVA como refuerzo en el hormigón.

# SEGUNDO CAPÍTULO

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Propiedades del hormigón

El hormigón es uno de los materiales más usados en el mundo y en nuestro país, principalmente en el uso de pavimentos y edificaciones. Este material se compone principalmente de cemento, agua, áridos y aditivos (plastificantes, retardantes, acelerantes, etc.), que mezclados en diferentes tipos de proporciones generan hormigones de diferentes características, donde una de las más importante es la resistencia a compresión a los 28 días ( $f'_c$ ), que normalmente puede variar desde 5 (MPa) a 60 (MPa), dependiendo de los requerimientos y uso del hormigón.

Debido a las diferentes cargas que actúan sobre los elementos de hormigón (cargas vivas, cargas muertas, sismos, viento, etc.) se generan esfuerzos a tracción y es en este ámbito donde el hormigón se ve en desventaja en relación con otros materiales como el acero o madera, ya que la resistencia a tracción del hormigón es aproximadamente el 10% de la resistencia a compresión (Figura 2.1). Además, existen estudios que indican que la resistencia a tracción por flexión es un 35% mayor que la resistencia a tracción directa [32]. Aun así, es un valor bajo comparado con la magnitud de las cargas que debe soportar [16].

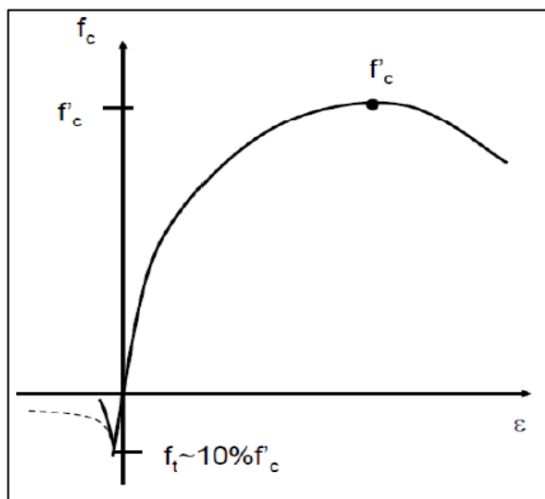


Figura 2.1: Gráfico de Esfuerzo-Deformación para el hormigón.

Otra característica en donde el hormigón no tiene un buen rendimiento es la ductilidad, ya que el hormigón al ser una mezcla a base de cemento tiende a comportarse de manera frágil luego del peak de resistencia, es decir, no tiene una capacidad de elongación en su etapa plática de deformación.

Es por estas características que es necesario reforzar la matriz de hormigón con otros materiales que ayuden a soportar estos esfuerzos, sobre todo para las cargas a tracción.

## 2.2. Propiedades de las fibras para refuerzo

Existen diversos tipos de fibras que se usan en el hormigón, siendo las más comunes las fibras de acero, polietileno, polipropileno y carbono. A estos tipos de hormigones se les llama “hormigones fibroreforzado” o usando las siglas “FRC”, que proviene del inglés “Fibre Reinforced Concrete”. En la Tabla 2.1 se observan las propiedades de diferentes tipos de fibras, fabricadas a partir de materias primas naturales o artificiales. Comúnmente se suele pensar en que la fibra más resistente o la de mayor elongación es la fibra óptima para utilizar de refuerzo, pero no es así, ya que se deben considerar diversos factores como el tamaño, la forma y relación entre largo y diámetro de la fibra, además de que el material sea compatible con la matriz de hormigón, lo que da mayor importancia al desempeño de la fibra dentro del hormigón que a sus propiedades mecánicas individuales.

Tabla 2.1: Tipos de fibras y sus propiedades [16].

Tipo de Fibra	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Elongación máxima [%]	Gravedad específica
Acrílico	210-410	2	25-45	1.1
Asbesto	550-960	80-135	~0.6	3.2
Algodón	410-685	5	3-10	1.5
Vidrio	1030-3790	70	1.5-3.5	2.5
Nylon	760-830	4	16-20	1.1
Poliéster	720-860	8	11-13	1.4
Polietileno	~690	0.1-0.4	~10	0.95
Polipropileno	550-690	3	~25	0.90
Seda artificial	410-620	7	10-25	1.5
Lana mineral	480-760	70-120	~0.6	2.7
Acero	280-2760	200	0.5-35	7.8

En el caso de las fibras de Alcohol de Polivinilo (PVA), este material es un polímero sintético, soluble en agua, no es tóxico y es resistente a aceites, grasas y disolventes. Debido a su propiedad hidrófila, puede generar enlaces químicos fuertes con mezclas de cemento y agua. Poseen una alta resistencia a la tracción (0.8 – 1.6 GPa), un alto módulo elástico (14 – 40 GPa) y una elongación de hasta 11%.

Las propiedades resistentes de las fibras, tanto de PVA u otro tipo de material, se obtienen mediante un ensayo llamado “extracción de una sola fibra” o “pull-out”. Esta prueba se puede dividir en tres partes (Figura 2.2): primero la etapa de desprendimiento que se ilustra en la parte a del gráfico que muestra el aumento de la fuerza hasta llegar a un peak en  $P_a$  donde la fibra se desprende totalmente de la matriz de cemento y la deformación correspondería a la etapa elástica

de la fibra. Luego se genera una caída en la fuerza hasta  $P_b$  cuando toda la fibra incrustada se ha desprendido. Finalmente, la fibra puede sufrir un endurecimiento por deslizamiento, fricción constante o ablandamiento por deslizamiento. La respuesta típica en fibras sintéticas es el primer caso, lo que es muy beneficioso siempre y cuando no se exceda la tensión máxima de la fibra, porque puede ocurrir la rotura temprana de la fibra [21].

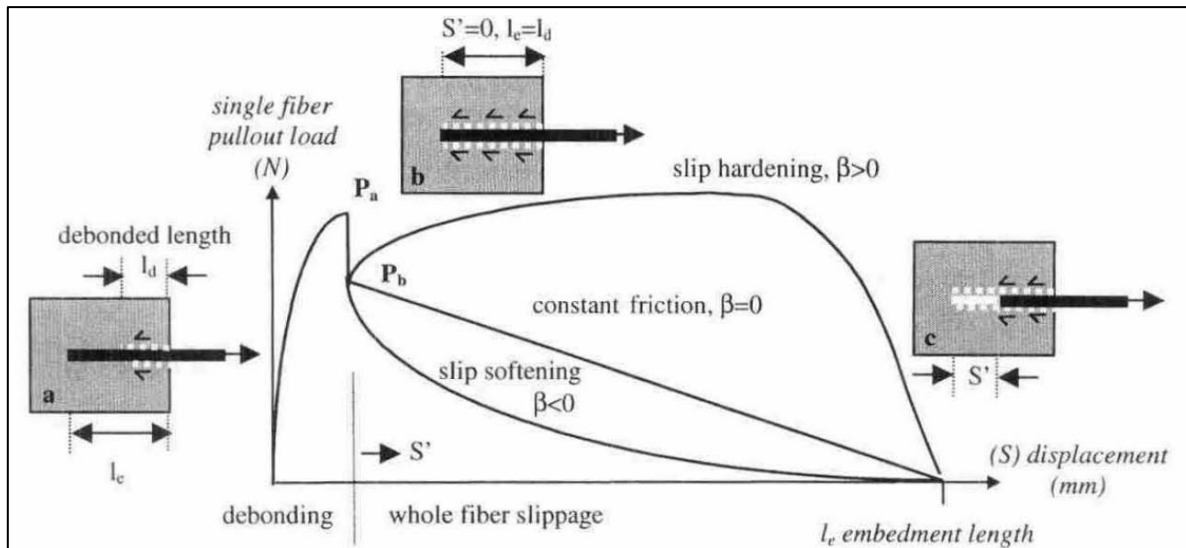


Figura 2.2: Curva de ensayo "pull-out" [21].

Las fibras dentro de la matriz de hormigón tienden a disminuir su resistencia a tracción nominal, ya que, al momento de producirse esfuerzos externos, las fibras sufren de abrasión y delaminación debido al roce que existe entre las fibras y la matriz, generando una resistencia aparente. Es por este fenómeno, que la mayoría de las fibras usadas en los ECC o FRC son aceitadas, lo que disminuye la energía de unión de la fibra a la matriz, haciéndola más hidrófoba. Esto disminuye la probabilidad de obtener una rotura temprana de la fibra, que muchas veces se produce debido a que, sin presencia de aceite, se requiere un mayor esfuerzo para extraer la fibra de la matriz. En la Figura 2.3 se observan gráficos con respuestas de fibras no aceitadas (a) y aceitadas (b), en donde se aprecia que para las fibras aceitadas se produce una respuesta más prolongada en el tiempo en comparación a las no aceitadas, que requieren mayor fuerza para ser desprendidas del hormigón [21].

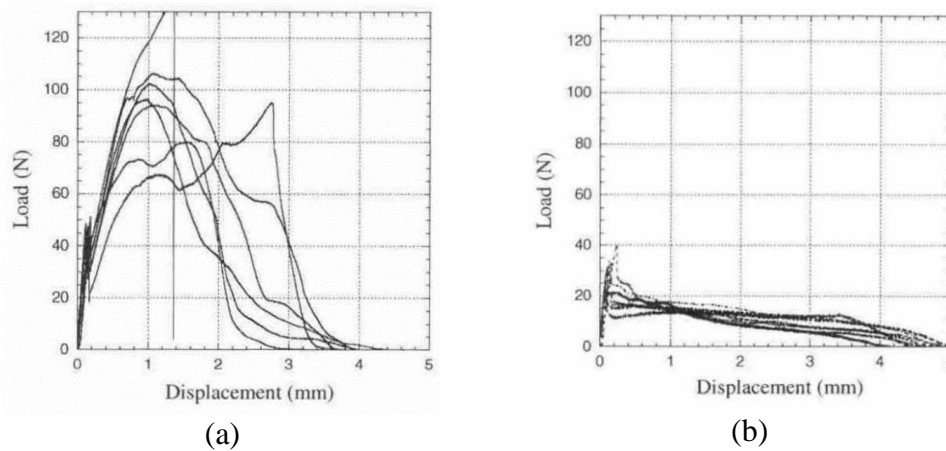


Figura 2.3: Ensayo Pull-out para fibras (a) no aceitadas y (b) aceitadas [21].

### 2.3. Comportamiento del hormigón reforzado con fibras

La adición de fibras a una matriz de concreto simple tiene poco efecto en su comportamiento antes de la fisuración, pero mejora sustancialmente su respuesta posterior a la fisuración, lo que conduce a una ductilidad y tenacidad mucho mejores [20]. En algunos casos con cierta cantidad de fibras produce un aumento en la resistencia a tensión, compresión [12],[25] y flexión [8], no siendo estas unas características importantes a mejorar.

Generalmente los hormigones fibroreforzados (FRC) contienen un volumen de fibra máximo de 2%, para mantener la trabajabilidad requerida en el hormigón. Los hormigones con un contenido de fibra menor al 1% de volumen son usados principalmente en losas y pavimentos expuestos al medio ambiente y sufren de fisuras debido a la contracción. En este caso, las fibras se distribuyen uniformemente en las tres dimensiones y son menos sensibles a la corrosión, tomando ventaja por sobre las barras de refuerzo de acero. Se aumenta el contenido de fibra entre 1% a 2% en el hormigón utilizado como “shotcrete” y en estructuras que deban resistir fatiga, delaminación y desconchado, ya que, con esta cantidad de fibra, se logra un aumento en la tenacidad a la fractura y una mayor resistencia a los impactos. Existe un tipo de hormigón reforzado con una cuantía de fibra superior al 2%, denominados HPFRC (high-performance fiber reinforced composites), en donde se destacan los ECC (Engineered cementitious composite), que pueden lograr una alta ductilidad, llegando a tener una deformación a la tracción del 3 al 7% [16]. Este tipo de compuesto es uno de los más estudiados en cuanto a refuerzo de fibras, siendo las más usadas las de acero o sintéticas.

En el comité ACI 544-96 [5] se describen tres tipos de fallas para hormigones del tipo ECC reforzados con fibras sintéticas, sometidos a tensión directa (Figura 2.4). En el primer tipo de falla la fractura se forma inmediatamente después del agrietamiento de la matriz, lo que se denomina “ablandamiento por deformación”. Esto puede ocurrir debido a un contenido inadecuado de fibras o una longitud de fibra insuficiente. En el segundo modo de falla, la matriz continúa soportando una carga inferior al peak y se genera una mayor tenacidad y ductilidad en la mezcla. En el tercer

tipo de falla el hormigón continúa soportando una carga mayor a la de fisuración, esta respuesta se denomina “endurecimiento por deformación”.

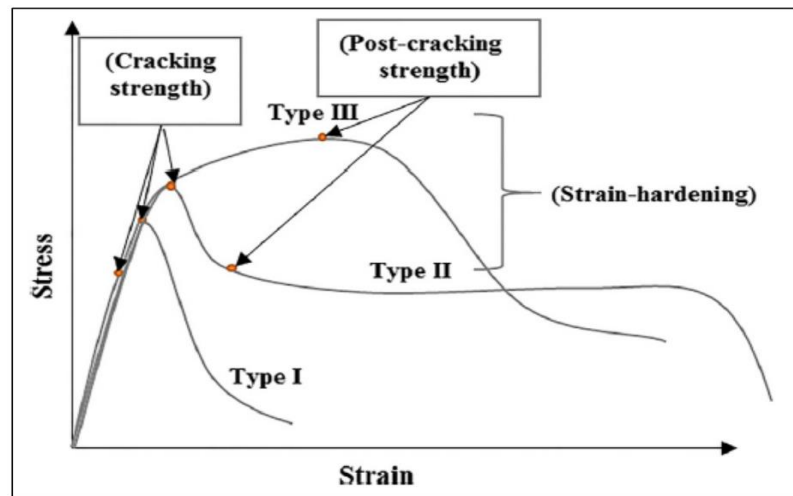


Figura 2.4: Comportamiento del hormigón reforzado con fibras bajo tensión directa [5].

En el estudio realizado por Li et. al (1998), se demostró que se puede lograr un comportamiento de “strain-hardening” en un hormigón FRC, utilizando fibras de acero o de PVA (Figura 2.5). Si bien, las fibras de acero logran una mayor resistencia a la tracción, se debe tener en cuenta que la confección de SFRC (Steel Fibre Reinforced Concrete) es más costosa en comparación a un FRC con fibras de PVA, ya que las fibras de PVA poseen menor densidad, necesitan menos aglutinante y son más duraderos contra la corrosión. Además, la fibra de PVA logra una ductilidad similar que la fibra de acero y superior a la fibra de polipropileno (Grace Micro).

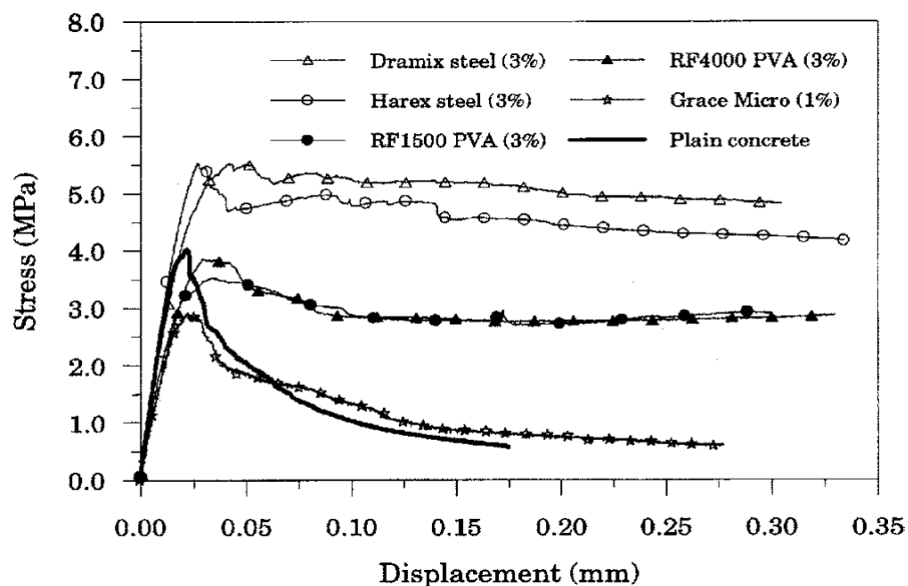


Figura 2.5: Comparación de la respuesta a tensión directa con diferentes tipos de fibras [13].



En cuanto al comportamiento a compresión, Ayub et al. (2019) realizó ensayos en hormigones FRC con fibras de PVA, con un tamaño máximo de árido de 19 mm, fabricando muestras que resistían tensiones en un rango de 72 a 86 MPa. En la Figura 2.6 se muestran los resultados para las muestras tipo “P”, que corresponden a muestras con el 100% de cemento, diferenciándolas de otros tipos de muestras en donde se sustituyó el 10% del cemento por metacaolín o humo de sílice. En este gráfico se observa que el esfuerzo máximo en compresión no varía significativamente según la cantidad de fibra agregada, pero si se observa una mejora en cuanto a deformación en el peak de tensión y también en la respuesta residual, formando una curva menos pronunciada en comparación con la muestra sin fibra [3].

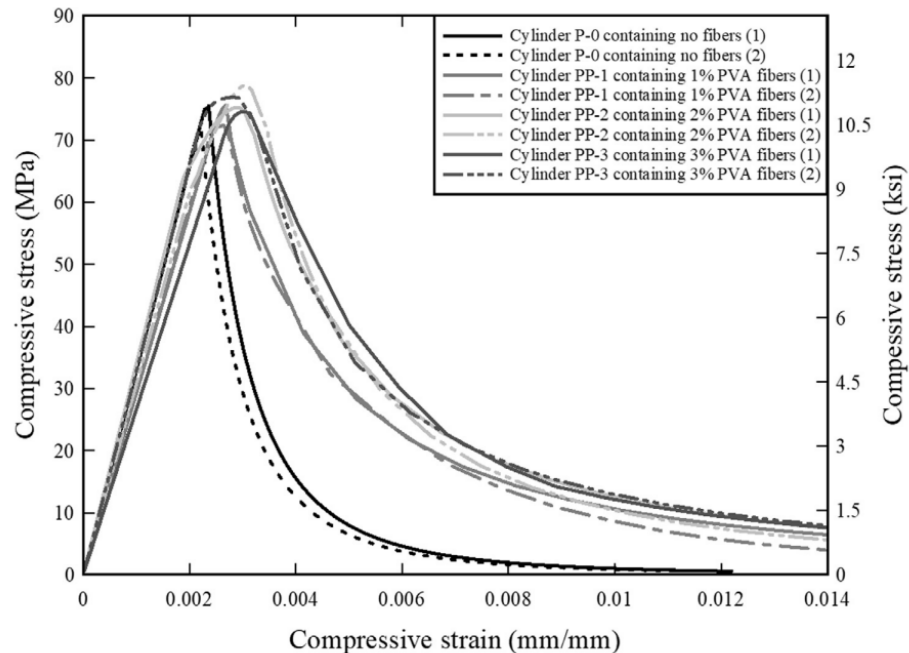


Figura 2.6: Resultados ensayo a compresión de FRC con fibra de PVA (0%, 1%, 2% y 3% de volumen) [3].

En el estudio de Reveco (2020) se ensayaron probetas a compresión bajo condiciones similares a las de esta investigación, utilizando porcentajes de fibra de PVA de 0%, 0.62% y 1.23%. En la Figura 2.7 se observan los resultados de muestras con agregado grueso (diámetro máximo 12.5 mm) reforzadas con fibra de PVA del tipo REC 15/12 mm, en donde M01 corresponde a una mezcla sin fibra, M02 a una mezcla con 0.62% de volumen de fibra y M03 a una mezcla con 1.23% de volumen de fibra. Se puede observar que la tensión máxima se ve mínimamente alterada con la incorporación de la fibra y la capacidad de deformación aumenta a medida que se agrega mayor cantidad de fibra.

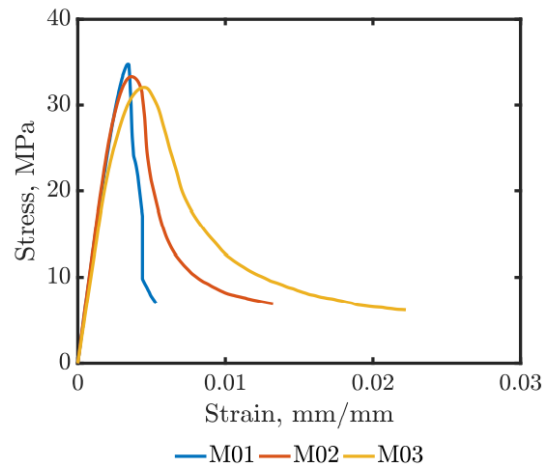


Figura 2.7: Resultados de ensayo a compresión realizado por Reveco (2020) para muestras con fibra de PVA tipo REC 15/12 mm [22].

Respecto al comportamiento a flexión, Sasmal et al. (2016) hicieron estudios con hormigón del tipo ECC reforzado con fibras de PVA, realizando diversos ensayos a flexión. En la Figura 2.8 se pueden observar resultados para una cuantía de fibra del (a) 1% y de (b) 2%, en donde se aprecia una gran mejora en ductilidad para ambas cuantías, un mayor esfuerzo máximo a flexión y un agrietamiento tardío para un ECC con 2% de fibra. Además, se logra un comportamiento de “strain-hardening” para ambas muestras debido a una gran capacidad de absorción de energía en la etapa posterior a la fisuración gracias a la adición de las fibras. Esto se debe al trabajo asociado a la extracción de la fibra, que genera un fenómeno denominado “efecto de puente” dentro de la grieta, que se muestra en la Figura 2.9.

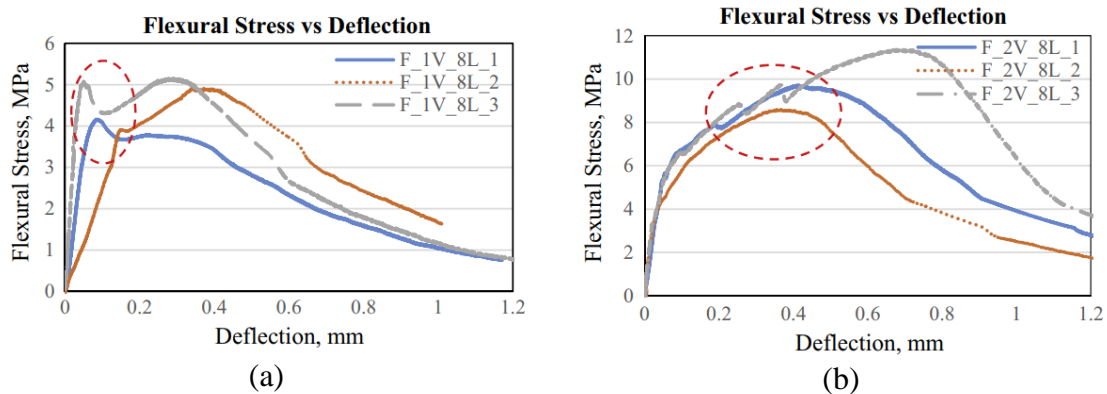


Figura 2.8: Comportamiento a flexión de ECC con cuantías de fibras de PVA de (a) 1% y (b) 2% [26].

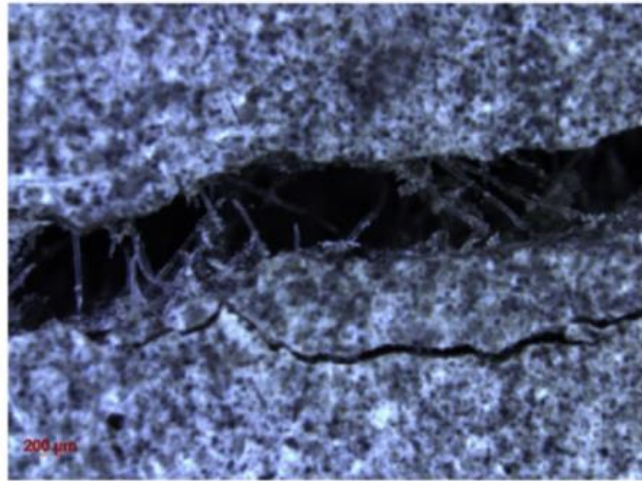


Figura 2.9: Efecto de puente a través de la grieta [26].

Allahverdi et al. (2010) demostró que para cierta relación agua cemento (0.3), se logra una mejor resistencia a la flexión para un valor de 0.016 de relación fibra/cemento (Figura 2.10). Para relaciones agua cemento bajas esto no ocurre ya que al tener menos agua no se produce una hidrólisis completa del polímero y una dispersión efectiva entre las partículas de cemento. Para relaciones agua cemento muy altas produce un volumen de poros grande lo que debilita el comportamiento a flexión.

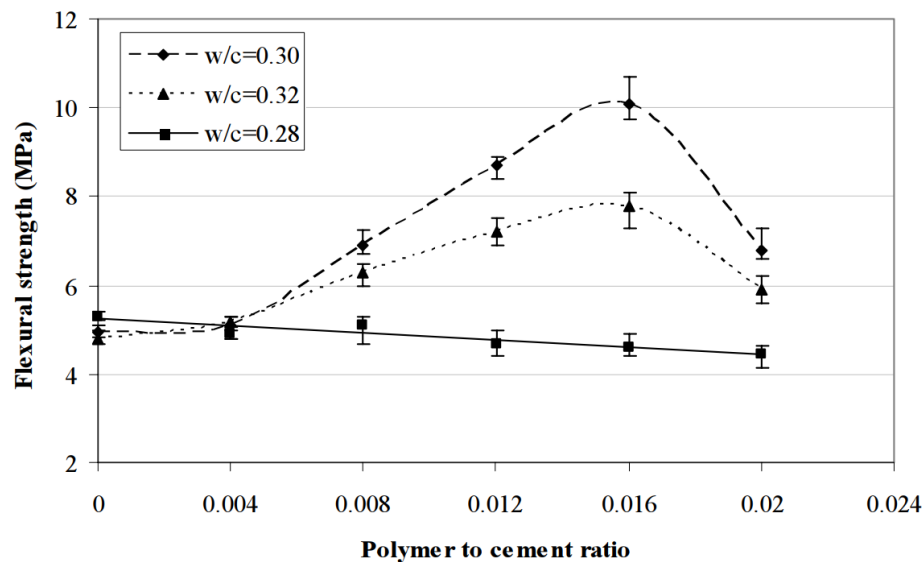


Figura 2.10: Respuesta a la flexión según la relación PVA/cemento [2].

También se ha demostrado que el uso de fibras en el hormigón disminuye la trabajabilidad de la mezcla a medida que crece la cuantía de fibras. Noushini et al. (2013) lo confirma en su estudio, en donde confeccionó muestras de FRC con fibras de PVA no aceitadas, con un tamaño

máximo de árido de 20 mm. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.2, en donde se aprecia un asentamiento (Slump) menor a medida que se aumenta el volumen de fibra, llegando a ser cero para una cuantía de 1%, a pesar del aumento en la dosis del aditivo reductor de agua (HWR). También se observa un aumento en el contenido de aire a medida que se agrega más volumen de fibra.

Tabla 2.2: Resultados de las propiedades del hormigón fresco [18].

Mix reference	Vf [%]	Fibre length [mm]	HWR / C* [%]	Slump** [mm]	Air Content** [%]	Mass per unit volume** [kg/m <sup>3</sup> ]
NFRC.1	0	0	0.25	110	0.7	2510
NFRC.2	0	0	0.33	100	1.1	2450
FRC.1	0.25	6	0.36	90	1.4	2410
FRC.2	0.25	12	0.38	60	1.3	2390
FRC.3	0.50	6	0.46	45	1.5	2390
FRC.4	0.50	12	0.67	20	1.4	2320
FRC.5	1.00	6	1.90	0	1.2	2270

\*Cementitious materials (binders)

\*\*Slump, Air content and Mass per unit volume calculated to the nearest 5 mm, 0.2% and 10 kg/m<sup>3</sup> respectively, in accordance with AS1012.3.1, AS1012.4.2 and AS1012.5

Además, se ha comprobado que las fibras de PVA forman una mayor cantidad de fisuras múltiples, fenómeno denominado “agrietamiento múltiple”, en comparación, por ejemplo, con las fibras de polipropileno, como se observa en la Figura 2.11 en un estudio realizado por Peagle & Fischer (2012). Este fenómeno es uno de los más importantes y es el objetivo principal que se busca al usar fibras en el hormigón, y así no se genere una falla inmediata con una sola grieta.

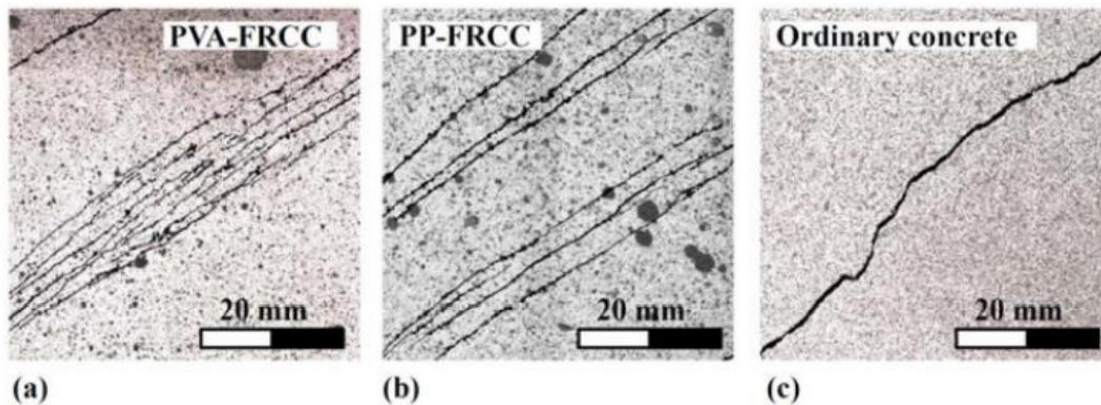


Figura 2.11: Agrietamiento múltiple usando fibras de PVA (a) y polipropileno (b) [19].

## 2.4. Forma de probeta y velocidad de deformación

En los ensayos a tracción directa se suelen utilizar diversos tipos de probetas, siendo las más comunes las muestras cilíndricas y la probeta en forma de "hueso de perro" (Figura 2.12). La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) recomienda el uso de probetas en forma de hueso por sobre otras formas de muestras [10]. Se ha demostrado que la resistencia máxima a tracción y la capacidad de deformación en este tipo de probetas es mayor en comparación a probetas en forma de cilindro [11]. En la Figura 2.13 se observan las curvas comparando estos tipos de probetas de ECC con fibras de PVA y de Polietileno (PE), con muestras cilíndricas de diámetro 50 (mm) y probetas en forma de hueso de perro con una sección transversal de 25x25 (mm).

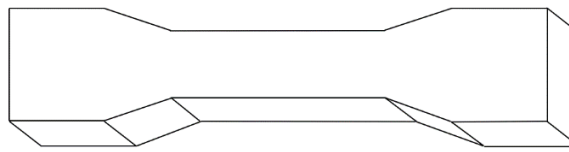


Figura 2.12: Forma típica probeta "hueso de perro".

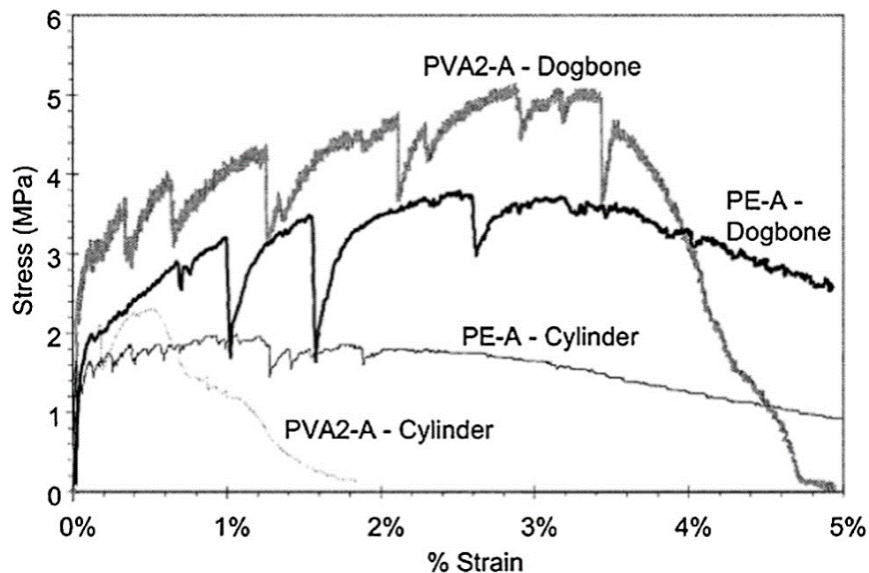


Figura 2.13: Curvas tensión-deformación para especímenes en forma de "hueso de perro" y cilíndricos [11].

Estas diferencias pueden ser atribuidas a diferentes factores, tales como: variaciones en las imperfecciones iniciales, como aire atrapado y grietas por contracción, variaciones en la orientación de las fibras y las condiciones de borde [31]. Aun así, los estudios sobre los efectos de

la geometría de las probetas en las propiedades del hormigón o de ECC son aún limitados y se necesita mayor sistematización de este tipo de investigaciones.

Otro factor importante en las propiedades mecánicas del hormigón es la velocidad de deformación. El hormigón estructural, a lo largo de su vida útil, es sometido a diversas cargas como sísmicas, impactos, cargas vivas o muertas, e incluso, explosiones. Cada una de estas cargas genera diferentes tasas de deformación en el material. Por ejemplo, un sismo genera una tasa de deformación que va desde los  $10^{-3}$  ( $s^{-1}$ ) a  $10^{-1}$  ( $s^{-1}$ ), para impactos fuertes se genera una tasa de deformación entre  $1 - 50$  ( $s^{-1}$ ) y en casos extraordinarios como explosiones se genera una tasa de deformación superior a  $10^2$  ( $s^{-1}$ ) [6].

En la Figura 2.14 se muestran los resultados de un estudio realizado por Yang & Li (2014) sobre el impacto de la tasa de deformación en las propiedades del PVA-ECC, que van desde los  $10^{-5}$  ( $s^{-1}$ ) a los  $10^{-1}$  ( $s^{-1}$ ) [7]. En este estudio se demuestra que la fragilidad de las muestras aumenta con la velocidad de deformación, lo que puede ser desfavorable para estructuras que estén sometidas a cargas de impacto o de mayor tasa de deformación.

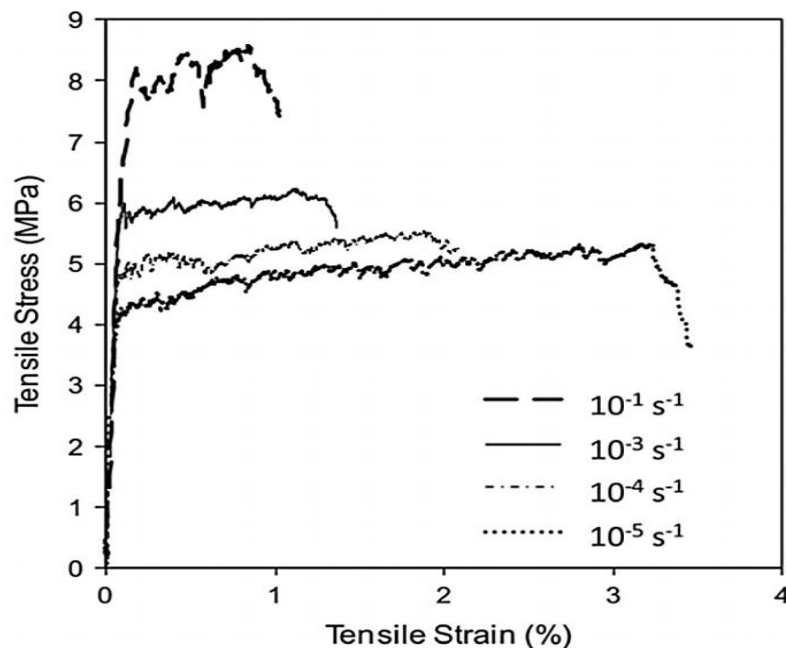


Figura 2.14: Curvas tensión-deformación de PVA-ECC para diferentes tasas de deformación [7].

## 2.5. Efecto del tamaño máximo de árido

Los áridos finos o gruesos, suelen ocupar una parte muy importante dentro de la mezcla de hormigón. La mayoría de los estudios relacionados con fibras están centrados en hormigones del tipo ECC. En estos tipos de concreto se utiliza un árido muy fino, de tamaño máximo de 1 mm, lo

que facilita la adherencia de la fibra a la matriz de cemento, obteniendo una respuesta dúctil y de endurecimiento por deformación. La presencia de agregados de un mayor tamaño que el espaciado promedio entre las fibras puede generar la formación de bolas y hace que sea más difícil tener una dispersión uniforme de las fibras, generando aglutinación entre ellas [23].

En un estudio realizado por Sahmaran et al. (2012), se demuestra que un mayor tamaño y cantidad de agregado en la mezcla de hormigón genera una mayor tenacidad a la fractura. En la Figura 2.15 se observa una comparación de ensayos a tracción de ECC con áridos de tamaño máximo 0.4 (mm) y 1 (mm), con relaciones de árido/cemento que van desde 0.36 a 0.55. En los ECC, una mayor tenacidad a la fractura puede ser perjudicial para obtener una mejor ductilidad y un agrietamiento múltiple, ya que las grietas tienen a propagarse por zonas débiles dentro de la matriz o sectores con mayor porosidad, entonces, al tener una mayor cantidad de áridos, o partículas de mayor tamaño, las grietas se encontrarán con estos granos y decidirán rodearlos y propagarse por la zona de transición interfacial, lo que resulta una trayectoria más tortuosa y se requeriría mayor energía para completar la fractura. Un aumento en la energía de fractura puede generar roturas tempranas de las fibras contenidas en la matriz, ya que se alcanzaría una tensión igual a la resistencia máxima aparente de la fibra dentro de la matriz, lo que es perjudicial para la obtención de una respuesta dúctil [21].

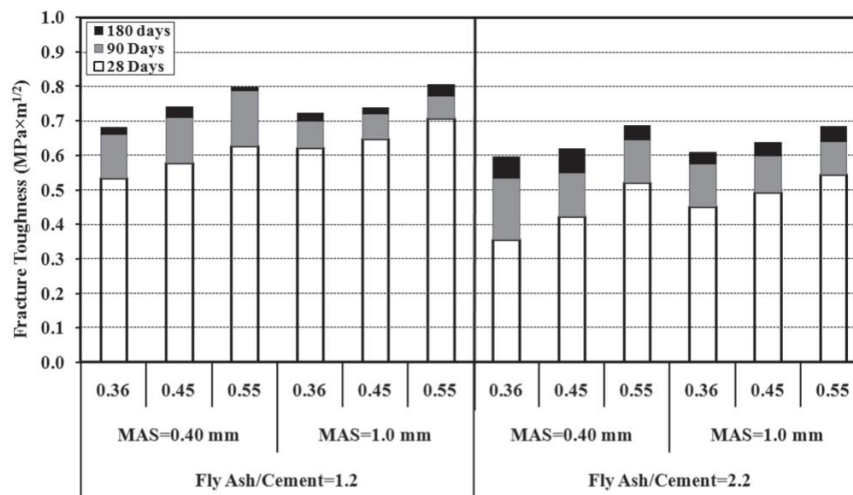


Figura 2.15: Tenacidad a la fractura según tamaño de árido para ECC [24].

Otra característica importante es el efecto que produce la forma o geometría de los áridos en la respuesta dúctil del hormigón reforzado con fibras. En la Figura 2.16 se muestran los resultados de un estudio realizado por Sahmaran et al. (2009), donde se compararon muestras de vigas ECC con tamaños máximo de árido de 1.19 (mm) y 2.38 (mm), con arena triturada y arena de grava natural. Se aprecian curvas de resistencia a la flexión versus deflexión con comportamiento de endurecimiento por deformación típicas para los ECC. Se observa una mejor ductilidad en las muestras con arenas de grava natural con un tamaño máximo de árido de 1.19 (mm), ya que un menor tamaño de árido mejora la ductilidad al verse disminuida la energía de fractura. Además, las partículas de arena triturada presentan una mejor adherencia en la matriz en comparación a las

partículas más redondeadas de gravas naturales, por lo que la ductilidad será mayor en las muestras con gravas naturales [23].

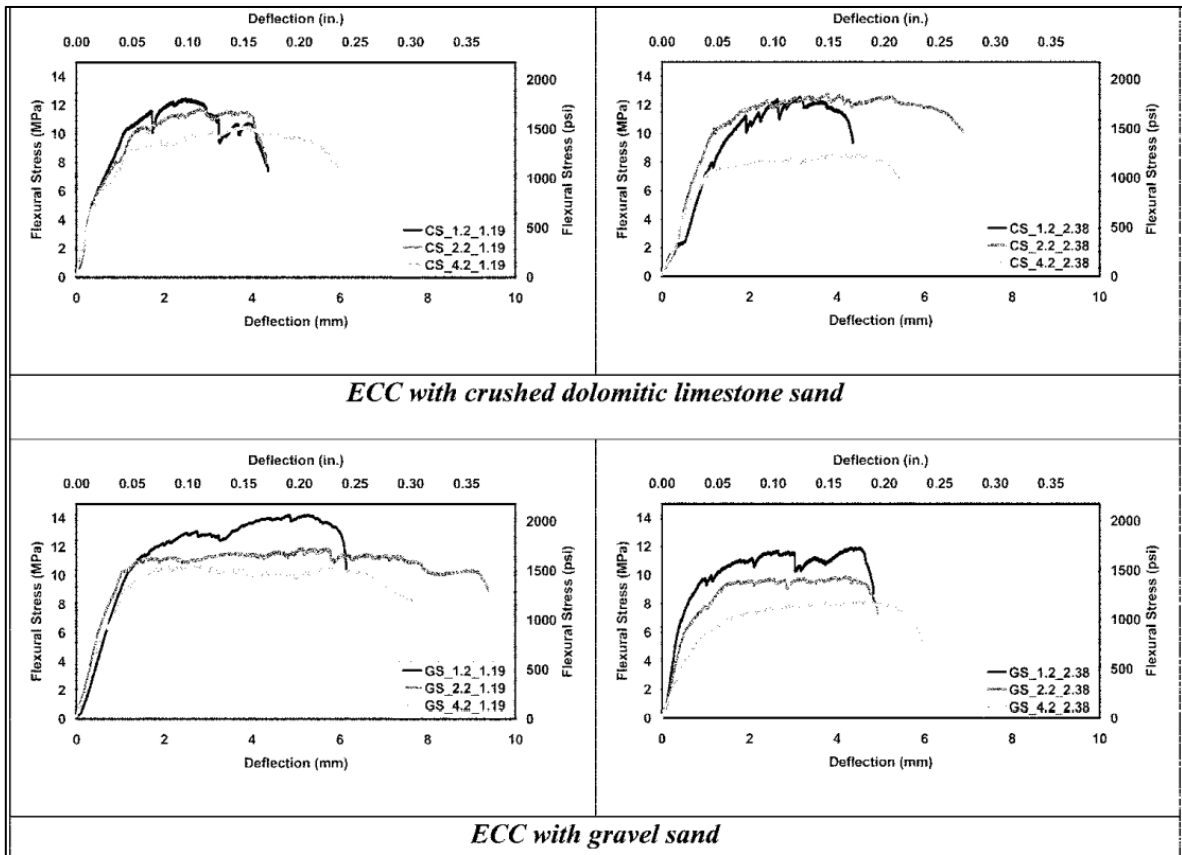


Figura 2.16: Efecto de geometría de las partículas de agregado [23].

## 2.6. Análisis mediante fotogrametría

El uso de la fotogrametría en la ingeniería civil ha avanzado notablemente. Esta técnica se ha empleado principalmente en el área de la topografía, para confección de plano y construcción de caminos, y también en la geotecnia, para medir deformaciones en muestras de suelo.

Se ha logrado desarrollar una técnica basada en la fotogrametría, que permite medir deformaciones en materiales sin el contacto físico con la muestra. Esta técnica se denomina Correlación de Imágenes Digitales (DIC), que utiliza algoritmos de correlación de imágenes para medir y comparar fotografías tomadas consecutivamente a la superficie analizada, partiendo desde una imagen con la superficie sin deformar, hasta la imagen final de la superficie deformada. Esta técnica ha sido utilizada para el análisis de deformaciones en diversos tipos de materiales, como el hormigón, polímeros, soldaduras o madera [29].

El programa utilizado para realizar el análisis DIC es Ncorr [4], que corresponde a un software open-sourced (OSS), es decir, de acceso público y gratuito, y que está compuesto por



diferentes códigos programados en MATLAB. Ncorr le permite al usuario establecer el área de análisis y la cantidad de píxeles que actuarán como un “punto”, con el fin de minimizar el tamaño de las matrices y reducir la carga computacional. Este programa utiliza el algoritmo “Inverse Compositional Gauss-Newton” (ICGN) para optimizar el coeficiente de correlación no lineal y poder calcular las deformaciones de Green-Lagrange.

Ncorr ha sido utilizado en varias investigaciones que tienen como objetivo analizar las deformaciones en elementos de hormigón, como muros o vigas. En el trabajo de Manríquez (2016) (Figura 2.17) se determinan los desplazamientos y deformaciones de muros de hormigón armado sometidos a carga lateral cíclica, en donde se comparan los resultados obtenidos por los LVDT's instalados en el muro con los resultados del programa Ncorr, los cuales son similares, sobre todo en el análisis de grandes desplazamientos, cercanos a 3 (mm). En la investigación realizada por Muñoz (2017) [17] también se ensayan muros de hormigón armado, en este caso con abertura en la base y presencia de losas, donde logra analizar la influencia del largo de la abertura central sobre las propiedades mecánicas del material, y también logra analizar las deformaciones y la formación de grietas al momento de aplicar una carga axial controlada y constante de 400 (kN), generando un desplazamiento pseudo estático. Finalmente, en el estudio realizado por Reveco (2020) [22] se realizó un análisis de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de PVA, en donde se compara la deflexión máxima y resistencia a flexión obtenidas tanto para vigas sin presencia de fibras y vigas reforzadas con fibra de PVA.

Ncorr permite conocer las deformaciones en estos elementos en cualquier instante del ensayo y de manera más completa en comparación a un sensor LVDT, que solo entrega información en un solo eje. También, Ncorr permite analizar el tipo de grietas que se observan en las muestras, ya sean de flexión, corte o ambas.

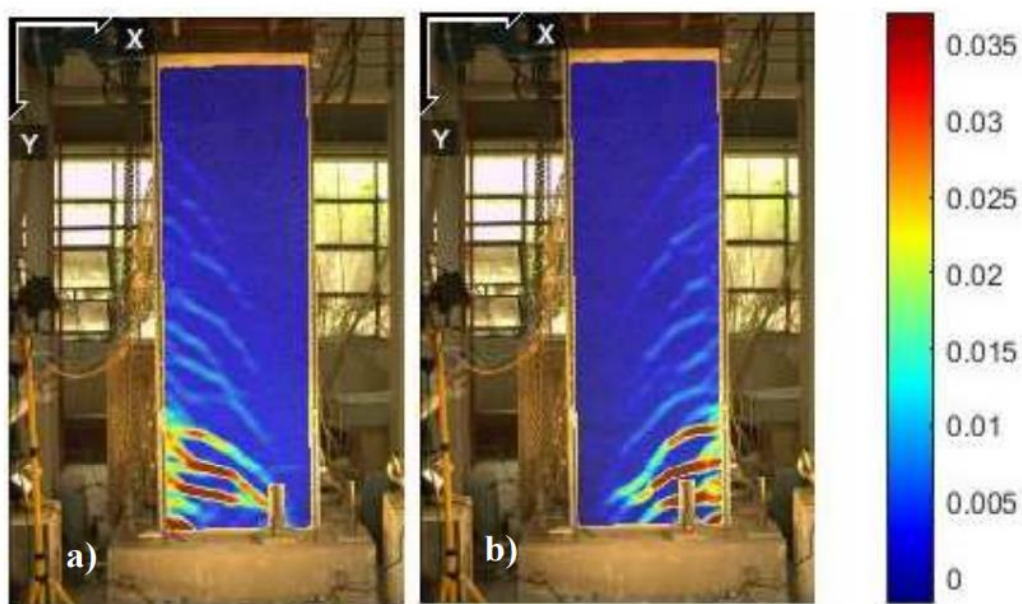


Figura 2.17: Deformaciones verticales ( $\epsilon_{yy}$ ) obtenidas del programa Ncorr: a) Sentido positivo; b) Sentido negativo [15].

## TERCER CAPITULO

### 3. Metodología Experimental

En este capítulo se detallan los procesos llevados a cabo para confección de probetas finales destinadas a ensayos de tracción y flexión. Primero se describen los materiales utilizados para formar las diferentes mezclas de hormigón, luego se explica el procedimiento ocupado para realizar las mezclas y sus diferentes dosificaciones, y finalmente se muestra el resumen de todas las muestras destinadas a ensayos y las características de los dispositivos a tracción y flexión. Además, se explica cada decisión tomada durante esta etapa previa a la obtención de resultados.

#### 3.1. Materiales utilizados

En esta sección se detallan los materiales usados para la confección de las diferentes mezclas de hormigón reforzado con fibras de PVA (PVA-FRC). Estos materiales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Materiales usados para mezcla de hormigón.

<b>Materiales</b>	<b>Descripción</b>
Cemento	Tipo “puzolánico, grado corriente”, según norma Nch 148of68.
Áridos	Arena fina, Arena gruesa y Gravilla.
Fibra de PVA	Fibra KURALON™ REC 15/12 mm aceitada.
Superplastificante	Sika Viscocrete 5200 CL
Agua	Agua potable de grifo

A continuación, se describen más detalladamente los tipos de áridos empleados y la fibra de PVA utilizada en la mezcla, ya que estos materiales son los que producen una variabilidad en los resultados de los distintos ensayos. También se caracteriza el acero de refuerzo utilizado en las vigas de hormigón armado.

##### 3.1.1. Fibra de PVA

La fibra de PVA utilizada para la confección de mezclas es la KURALON™ REC 15/12 mm (Figura 3.1), que es un tipo de fibra aceitada de 12 mm de largo y que fue añadida en diferentes cuantías en relación con el volumen de la mezcla de hormigón. Las propiedades mecánicas de este tipo de fibra de PVA se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Propiedades de la fibra de PVA KURALON™ REC 15/12 mm.

<b>Diámetro</b> <b>(μm)</b>	<b>Largo</b> <b>(mm)</b>	<b>Resistencia a</b> <b>tracción</b> <b>(MPa)</b>	<b>Gravedad</b> <b>específica</b> <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de</b> <b>Young</b> <b>(GPa)</b>	<b>Elongación</b> <b>máxima</b> <b>(%)</b>
40	12	1560	1.29	41	6.5



(a)



(b)

Figura 3.1: Fibra de PVA KURALON™ REC 15/12 mm.

### 3.1.2. Áridos

Para analizar el comportamiento del hormigón con fibra de PVA según el tamaño máximo de agregado, se utilizan tres tipos de áridos para la confección de mezclas: arena fina, arena gruesa y gravilla. Para obtener una buena clasificación de los áridos, estos deben ser caracterizados según su tamaño máximo de partícula, por lo que se realiza un análisis granulométrico a cada tipo de agregado utilizando tamices ASTM (Figura 3.2). Los tamices utilizados, con sus respectivos tamaños de apertura, se observan en la Tabla 3.3.



Figura 3.2: Tamiz ASTM.

Tabla 3.3: Tamaño de apertura según tamiz

<b>Tamiz</b>	<b>Apertura (mm)</b>	<b>Tamiz</b>	<b>Apertura (mm)</b>
3/4"	19	#30	0.6
1/2"	12.5	#40	0.475
3/8"	9.5	#50	0.3
#4	4.75	#100	0.15
#8	2.36	#200	0.075
#10	2		

Para un correcto análisis granulométrico, previamente se debe homogeneizar cada tipo de árido para que la muestra sometida a la granulometría sea totalmente representativa. Para esto se utiliza el método de división por cuarteo, que consiste en depositar sobre una superficie limpia todo el suelo contenido en los sacos del mismo tipo de árido, uno tras otro, formando una especie de cono invertido. Luego, con la ayuda de una pala, se divide el suelo en cuatro porciones iguales, se depositan en un contenedor dos cuartos opuestos, y los dos restantes son apaleados para formar nuevamente un cono invertido. Este proceso se repite hasta obtener una pequeña muestra que será utilizada en la granulometría.

Para el análisis granulométrico, se sigue el procedimiento típico estipulado por la ASTM C136, utilizando las herramientas necesarias, como balanzas, poruñas y recipientes en donde depositar las muestras. Primero se deben ordenar los tamices siguiendo un orden ascendente según el tamaño de apertura, teniendo el tamiz 3/4" en la parte de arriba. Luego se vierte la muestra de suelo en el primer tamiz y se agita hasta que no pasen más partículas al tamiz inferior. Se pesa la muestra contenida en el tamiz y se registra para los cálculos posteriores. Este proceso se repite por cada tamiz hasta llegar al recipiente final con el suelo fino retenido, registrando también la masa contenida en este.

Para la gravilla y arenas gruesa, se realizó todo el procedimiento mencionado anteriormente para obtener su granulometría respectiva. En el caso de la arena fina, se usaron dos arenas, a las cuales llamaremos Arena fina A y Arena fina B, las cuales se diferencian en su contenido de humedad. La arena fina A tiene una humedad de 1.82% y la arena fina B una humedad de 5.76%

al momento de realizar las muestras. En el caso de la arena fina A, se le realizó una granulometría en laboratorio, y la granulometría de la arena fina B se extrae del trabajo realizado por Reveco [22], quien utilizó esta arena anteriormente.

Los resultados se presentan en la Tabla 3.4 y las curvas se muestran en la Figura 3.3. La información específica de las granulometrías por cada árido se encuentra en el Anexo A.

Tabla 3.4: Resultados análisis granulométrico.

Tamiz N°	Diámetro [mm]	% Que pasa			
		Arena fina A	Arena Fina B	Arena gruesa	Gravilla
3\4	19	100.00	100.00	100.00	98.81
1\2	12.5	100.00	100.00	100.00	55.77
3\8	9.5	100.00	99.20	98.79	28.68
4	4.75	99.49	98.80	79.07	3.84
8	2.36	97.50	98.30	65.53	2.03
10	2	97.00	98.20	62.30	1.81
30	0.6	93.77	96.10	44.94	1.11
40	0.425	91.71	91.40	37.91	0.93
50	0.3	86.58	78.10	29.81	0.75
100	0.15	49.49	29.70	10.19	0.43
200	0.075	13.51		2.51	0.20

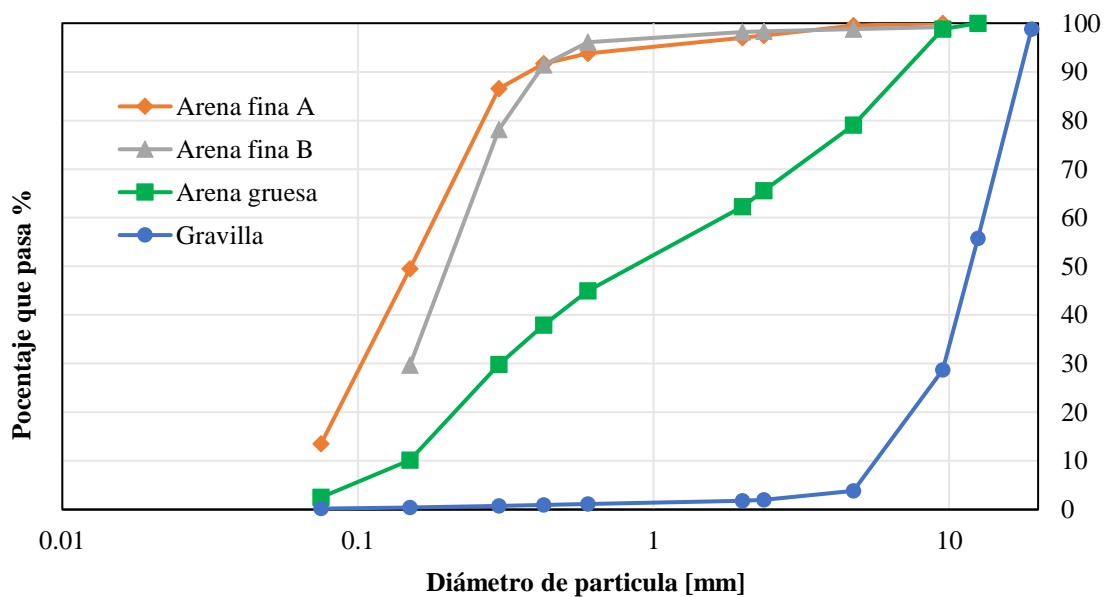


Figura 3.3: Curvas granulométricas los áridos utilizados.

### 3.1.3. Acero de refuerzo

Para la confección de vigas de hormigón armado con fibras de PVA, se disponen de barras de acero de 8 mm de diámetro ( $\phi 8$ ) que corresponden al tipo de acero A630-420H, con una resistencia máxima nominal a tracción ( $f_u$ ) de 630 MPa y una resistencia de fluencia nominal a tracción ( $f_y$ ) de 420 MPa.

Para comprobar las propiedades mecánicas de las barras de acero, se realizan ensayos a tracción a muestras de 15 cm de largo, en la maquina universal INSTRON® (Figura 3.4). Los resultados del ensayo son presentados en la Tabla 3.5 y la curva de tensión-deformación para la barra de acero se observa en la Figura 3.5.



Figura 3.4: Montaje del ensayo a tracción para una barra de acero.

Tabla 3.5: Resultados de las propiedades mecánicas del acero ensayado.

$f_y$ [MPa]	$\epsilon_y$ [mm/mm]	$f_u$ [MPa]	$\epsilon_u$ [mm/mm]	$E_s$ [GPa]
554.23	0.00246	764.98	0.1768	230

$f_y$ : Tensión de fluencia.

$\epsilon_y$ : Deformación de fluencia.

$f_u$ : Tensión máxima.

$\epsilon_u$ : Deformación máxima.

$E_s$ : Módulo de elasticidad.

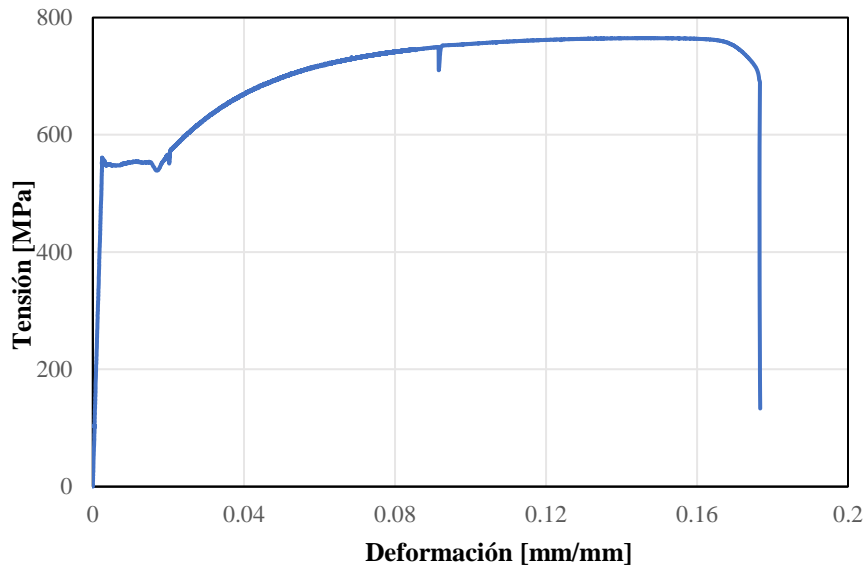


Figura 3.5: Curva tensión-deformación barra de acero  $\phi 8$ .

## 3.2. Preparación de mezclas

En esta sección se explica el procedimiento a seguir en la preparación de las mezclas, los materiales utilizados y se detallan las dosificaciones aplicadas en los tres tipos de mezclas y los áridos correspondientes a cada una de estas.

### 3.2.1. Procedimiento

Para comenzar la preparación de las mezclas, es necesario tener disponibles las herramientas a utilizar, tales como: porruñas o palas, recipientes, balanzas, varillas de acero, carretilla y moldes para llenar. En el caso de probetas cilíndricas, al ser una menor cantidad de mezcla, se utiliza un mezclador de pintura (Figura 3.6(a)) con potencia suficiente para realizar la mezcla y un balde de 20 litros, y para el llenado de viguetas prismáticas y vigas reforzadas con acero, se usa una betonera (Figura 3.6(b)) con capacidad de 150 litros y una carretilla para depositar la mezcla terminada.



(a) Mezclador de pintura.



(b) Betonera para hormigón.

Figura 3.6: Herramientas usadas para preparación de mezcla.

Las características de los moldes utilizados para confeccionar las diferentes probetas se describen en la Tabla 3.6 y se observan en la Figura 3.7.

Tabla 3.6: Dimensiones de moldes.

<b>Probeta</b>	<b>Largo (mm)</b>	<b>Altura/Diámetro (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Material</b>
Cilíndrica	210	105	-	PVC
Prismática	600	150	150	Poliuretano
Viga corta	1200	200	140	Madera
Viga larga	1900	200	140	Madera





(a) Molde Cilíndrico



(b) Molde prismático



(c) Moldes para Vigas

Figura 3.7: Moldes utilizados para confección de probetas.

Para comenzar con la preparación de la mezcla, se deben pesar los materiales a utilizar dependiendo del tipo de mezcla que se quiere realizar. Para probetas cilíndricas, se debe tener una cantidad de material necesaria solo para tres cilindros y así sea posible revolver los materiales con la mezcladora de pintura. En caso de probetas prismáticas, se junta el material para el llenado de dos moldes y tanto para vigas cortas o largas, se va realizando la mezcla para llenar un molde.

El procedimiento para realizar mezcla en el balde comienza con la homogenización de los áridos en un recipiente de tamaño suficiente como para que el proceso sea fácil de realizar. Luego se agrega el cemento al recipiente para homogenizar nuevamente. Se debe humectar previamente el balde que se utilizara para realizar la mezcla de hormigón. Luego se vierte  $1/4$  de agua y la mitad del material contenido en el recipiente dentro del balde, para comenzar a mezclar, posteriormente se vierte  $1/4$  de agua nuevamente. En caso de observar material pegado en las paredes del balde, se utiliza una barra para despegar el material golpeando o escarbando el balde y así no se pierda material. Se repiten los pasos anteriores hasta ocupar todo el material y se mezcla durante 3 minutos aproximadamente, hasta obtener una pasta homogénea. Posteriormente, para probetas con fibras de PVA, se debe mezclar durante 2 minutos más mientras se agrega la fibra lentamente, abarcando todo el balde.

En el caso de realizar mezclas en la betonera, el proceso es similar al anterior. Primero se debe humedecer la superficie interna de la betonera, ya que esta absorbe demasiada agua durante

el proceso de mezcla. Luego se agregan los áridos y se enciende la betonera por un minuto para homogeneizar. Después se agrega el cemento y se mezcla nuevamente. Luego se vierte 1/4 de agua en la betonera y se enciende nuevamente. Finalmente se va agregando el agua poco a poco, mezclando por no más 5 minutos, hasta obtener una mezcla homogénea. En el caso de que la mezcla contenga fibras de PVA, éstas se agregan al final con mucho cuidado con la betonera funcionando por unos 2 minutos más.

El proceso de llenado de moldes es similar tanto para probetas cilíndricas como para prismáticas o vigas. En el caso de los moldes para vigas y viguetas, estos deben aceitarse previamente para prevenir que el material se adhiera al molde y así sea más fácil la etapa de desmolde. Primero se vierte el hormigón hasta llenar 1/3 del molde y se introduce una barra de acero 25 veces realizando un movimiento espiral. Luego se golpea el molde por el exterior 25 veces abarcando todo el perímetro para hacer vibrar la mezcla. Posteriormente, se repiten los pasos anteriores hasta llenar el molde. Finalmente se enrasa la superficie para eliminar el material sobrante, se humecta la superficie libre de la mezcla y se cubre con papel transparente para evitar la evaporación del agua. Las probetas permanecieron en sus moldes durante todo el proceso de fraguado.

### 3.2.2. Tipos de mezclas y dosificación

Para poder apreciar de mejor manera el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de PVA, se realizan 3 tipos de mezclas, diferenciadas por el tamaño máximo de árido, donde la mezcla 1 (M1) contiene gravilla, arena gruesa y arena fina A, la mezcla 2 (M2) contiene arena gruesa y arena fina B, mientras que la mezcla 3 (M3) solo contiene arena fina B. El detalle de la dosificación de cada mezcla se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Dosificaciones de mezclas.

Mezcla	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla (kg/m <sup>3</sup> )	Arena Gruesa (kg/m <sup>3</sup> )	Arena Fina (kg/m <sup>3</sup> )	Tamaño máximo de partícula (mm)
M1	796	358.2	980	637	477	19
M2	796	405.96	-	1197	898	9.5
M3	796	405.96	-	-	2094	0.6

La cantidad de fibra de PVA agregada fue dosificada en relación con el volumen total de la muestra. Por cada tipo de mezcla, se realizaron diferentes probetas cilíndricas con una cuantía de 0%, 1.23% y 2% de fibras de PVA. Se usan estas cuantías para comparar resultados con el trabajo

realizado por Reveco (2020) [22], quien en su investigación realizo ensayos con probetas con un máximo de 1.23% de volumen de fibra de PVA. En el caso de probetas prismáticas, por cada tipo de mezcla se confeccionaron muestras con 0% y 2% de fibras PVA. Para las vigas con armadura de acero, se fabricaron muestras solo con la mezcla M1, con una cuantía de 0% y 2% de fibras de PVA. La cantidad de probetas por cada mezcla se detalla más adelante.

En relación con la dosificación de las mezclas, en un principio, la cantidad de agua era la misma para todas las mezclas (0.45 A/C), pero se decide aumentar la relación de agua/cemento a 0.51 en las mezclas M2 y M3 debido a que la trabajabilidad del hormigón era muy reducida, sobre todo al momento de agregar las fibras. Cabe señalar que la cantidad de superplastificante agregada al agua es la misma para todas las mezclas.

En el caso del árido fino, se decide utilizar la arena fina B en las mezclas M2 y M3, ya que al realizar estas mezclas con la arena fina A, esta absorbía gran cantidad de agua debido a su baja humedad, lo que generaba una mezcla muy seca.

No se realizaron cambios en la mezcla M1 ya que la trabajabilidad no se vio afectada al momento de agregar las fibras.

Sobre el tamaño máximo de partícula, en el caso de la arena fina, al momento de realizar las mezclas, se excluían todas aquellas partículas que excedieran el tamaño estipulado en la Tabla 3.10 y así no alterar las muestras.

### 3.2.3. Probetas

El detalle de las probetas fabricadas destinadas a ensayos se presenta a continuación, tanto para moldes cilíndricos (Tabla 3.8), prismáticos (Tabla 3.9) y vigas con armadura (Tabla 3.10).

Tabla 3.8: Cantidad de probetas cilíndricas.

<b>Volumen de Fibra</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>Total</b>
0%	6	6	6	18
1.23%	6	6	6	18
2%	6	6	6	18
<b>Total</b>				<b>54</b>

Tabla 3.9: Cantidad de viguetas prismáticas.

<b>Volumen de Fibra</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>Total</b>
0%	2	2	2	6
2%	2	2	2	6
<b>Total</b>				<b>12</b>

Tabla 3.10: Cantidad de Vigas de hormigón armado (M1).

Volumen de Fibra	Viga Corta	Viga Larga	Total
0%	1	1	1
2%	1	1	1
<b>Total</b>			<b>4</b>

En total, se confeccionan un total de 70 muestras destinadas a ensayos, en donde 54 corresponden a probetas cilíndricas que serán ensayadas tanto en compresión y tracción directa, 12 probetas prismáticas que serán ensayadas a flexión y 4 muestras de vigas con hormigón armado que también serán ensayadas a flexión.

### 3.3. Descripción de ensayos

#### 3.3.1. Preparación de probetas

Cuando las probetas estén listas para ensayarse, se deben desmoldar cuidadosamente. En el caso de las probetas cilíndricas, estas se desmoldan con la ayuda de una sierra, cortando el tubo de PVC cuidadosamente, para no dañar la probeta. Las probetas destinadas a ensayo de compresión deben ser refrentadas en la superficie superior (Figura 3.8). En el caso de las probetas ensayadas a tracción estas son adheridas a las placas metálicas mediante el uso de un adhesivo epóxico (Sikadur® 31 HMG).



(a)



(b)

Figura 3.8: (a) Probeta no refrentada, (b) Probeta refrentada.

En el caso de viguetas prismáticas, estas se desmoldan sobre una superficie lisa, con el molde boca abajo, se proceden a dar golpes sobre y por el costado del molde, hasta que la probeta logre salir cayendo lentamente. Para las vigas largas y cortas, el desmolde consiste simplemente en desatornillar las tablas.

### 3.3.2. Dispositivos de ensayo a tracción directa

El equipo utilizado para realizar los ensayos en probetas cilíndricas y viguetas prismáticas es la maquina universal Instron® modelo 600LX. A esta máquina se le adhieren dispositivos para ensayos a tracción y flexión que fueron diseñados por Jaime Reveco, Ingeniero Civil ex alumno de la Universidad de Chile.

Para el ensayo a tracción, se disponen de placas metálicas circulares adherida a ambas caras de la probeta y que son sostenidas por las mordazas de la maquina a través de una barra cilíndrica que sobresale de las placas. La unión entre la barra y la placa de metal está diseñada de manera tal que no afecte al ensayo alguna imprecisión al montar la probeta. El montaje a tracción se observa en la Figura 3.9.



Figura 3.9: Montaje ensayo a tracción directa.

En el caso del ensayo a flexión de probetas prismáticas se tiene un dispositivo conformado por dos placas metálicas rectangulares de gran tamaño, para que la probeta pueda ser ensayada correctamente. Ambas placas son ancladas a la maquina universal, donde la placa de menores dimensiones va en la parte superior. Además, ambas placas poseen dos puntos de apoyo cada una, que son móviles, lo que permite ensayar probetas de diferentes tamaños. El montaje a flexión se presenta en la Figura 3.10. Este dispositivo, y el de tracción directa, son explicados con mayor detalle en el Anexo B.



Figura 3.10: Dispositivo montado para el ensayo a flexión de viguetas.

La disposición de las cargas y apoyos del ensayo a flexión se muestra en la Figura 3.11, donde se tienen dos puntos de carga con un valor de  $P$  igual a la mitad de la carga que entrega la maquina universal, con una luz de ensayo ( $L$ ) de 500 [mm] y con una distancia ( $a$ ) de 150 [mm] entre los puntos de apoyo y de carga.

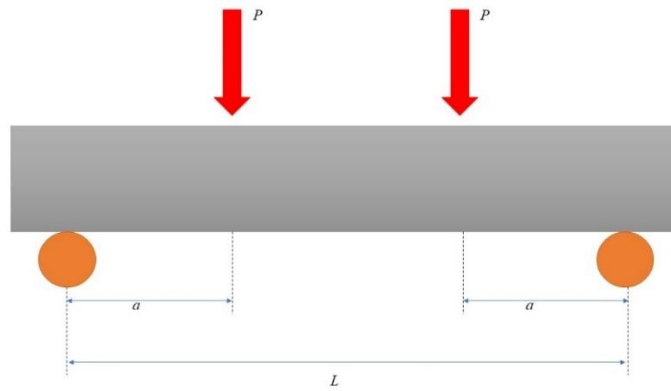


Figura 3.11: Esquema del ensayo a flexión de viguetas.

### 3.3.3. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión también se realiza en la maquina universal Instron® modelo 600LX, a la cual se le incorporan placas de carga metálicas en la zona superior e inferior. Para una medición más precisa de la deformación en la probeta, se adhiere un anillo de metal que sirve de soporte para los sensores LVDT. Estos anillos se fijan con mucha precaución con pernos sujetándose en la probeta, sin llegar a dañarla. En la Figura 3.12 se observa una imagen del montaje del ensayo a compresión.

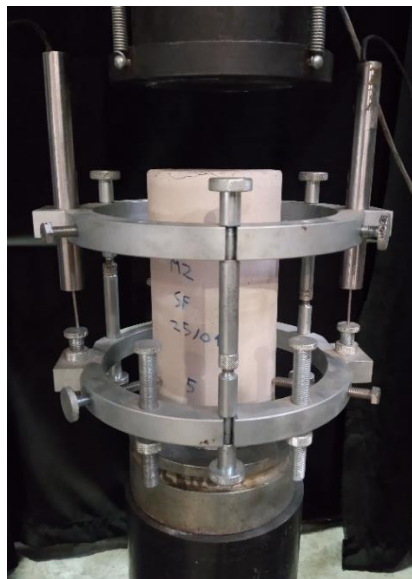


Figura 3.12: Montaje ensayo a compresión.

### 3.3.4. Ensayo de flexión en vigas con armadura

Este ensayo se realiza en el Laboratorio de Sólidos de la universidad, en donde existe un plataforma para poder montar vigas de gran tamaño. Se usa una prensa manual para aplicar la carga sobre la viga mediante una vigueta de carga metálica, que se apoya en dos puntos sobre la viga; y para medir el desplazamiento se usa un sensor ultrasónico Banner. Además, se aplica un patrón de puntos pintados aleatoriamente sobre una cara de la viga para realizar un estudio mediante fotogrametría, como se aprecia en la Figura 3.13.

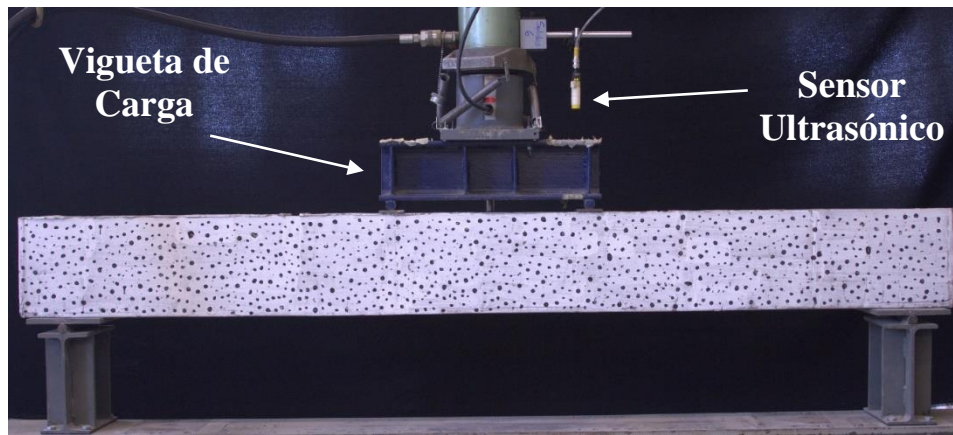


Figura 3.13: Montaje ensayo a flexión de vigas con armadura de acero.

El esquema de ensayo y el detalle de la armadura de acero en la confección de las vigas se muestra en las Figuras 3.14 y 3.15. Esta distribución de armadura se extrae del trabajo de Reveco [22], con el fin de comparar resultados, dado que en su investigación realizó ensayos de vigas con un porcentaje de 1.23% en volumen de fibra de PVA.

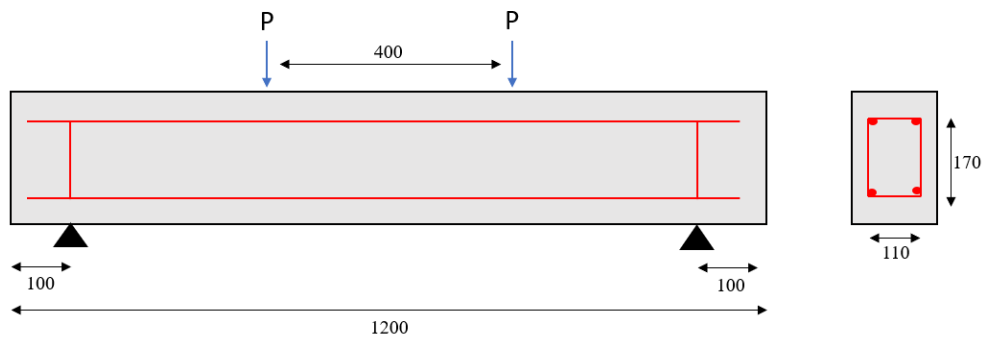


Figura 3.14: Detalle Viga Corta.



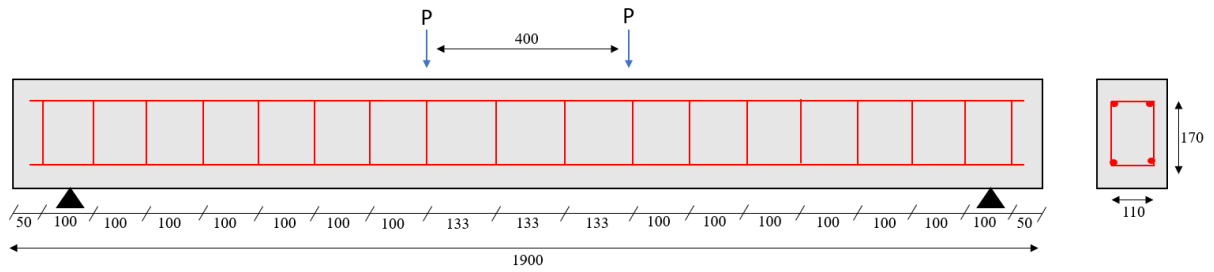


Figura 3.15: Detalle viga larga.

### 3.3.5. Resumen de probetas fabricadas

En esta sección se detallan las probetas a ensayar, tomando registro de la fecha de elaboración. Para la notación de las probetas, primero se le nombra con el tipo de mezcla (M1, M2 o M3), seguido de la cantidad de fibra (2%, 1.23% o sin fibra SF) y finalmente se le da una numeración a cada probeta. En el caso de las viguetas prismáticas, se antepone la letra “V” a la notación. A las vigas con armadura de acero se les nombra como “VC” a las vigas cortas y como “VL” a las vigas largas, seguido de la cantidad de fibra correspondiente.

En el caso de las probetas cilíndricas, se fabricaron seis muestras por cada mezcla y cuantía de fibra, en donde dos de ellas serán utilizadas para ensayar a compresión, otras dos serán destinadas al ensayo de tracción directa y las dos sobrantes serán utilizadas para pruebas preliminares o de reserva en caso de alguna falla. Para el ensayo a flexión, existen viguetas fabricadas anteriormente en el laboratorio para ser usadas en pruebas preliminares.

El resumen de las probetas construidas para las muestras cilíndricas, prismáticas y vigas de hormigón armado se presentan desde la Tabla 3.11 a la Tabla 3.13.

Tabla 3.11: Probetas cilíndricas.

<b>Probeta</b>	<b>Fecha elaboración</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Probeta</b>	<b>Fecha elaboración</b>	<b>Ensayo</b>
M1-SF1	20-01-2021	Compresión	M2-SF1	25-01-2021	Reserva
M1-SF2	20-01-2021	Compresión	M2-SF2	25-01-2021	Tracción
M1-SF3	20-01-2021	Tracción	M2-SF3	25-01-2021	Tracción
M1-SF4	20-01-2021	Reserva	M2-SF4	25-01-2021	Compresión
M1-SF5	20-01-2021	Reserva	M2-SF5	25-01-2021	Compresión
M1-SF6	20-01-2021	Tracción	M2-SF6	25-01-2021	Reserva
M1-1.23%1	27-01-2021	Tracción	M2-1.23%1	26-01-2021	Reserva
M1-1.23%2	28-01-2021	Tracción	M2-1.23%2	26-01-2021	Tracción
M1-1.23%3	28-01-2021	Compresión	M2-1.23%3	26-01-2021	Tracción
M1-1.23%4	27-01-2021	Compresión	M2-1.23%4	26-01-2021	Compresión
M1-1.23%5	27-01-2021	Reserva	M2-1.23%5	26-01-2021	Compresión
M1-1.23%6	27-01-2021	Reserva	M2-1.23%6	26-01-2021	Reserva
M1-2%1	28-01-2021	Reserva	M2-2%1	26-01-2021	Reserva
M1-2%2	28-01-2021	Compresión	M2-2%2	26-01-2021	Tracción
M1-2%3	28-01-2021	Compresión	M2-2%3	26-01-2021	Tracción
M1-2%4	28-01-2021	Tracción	M2-2%4	26-01-2021	Compresión
M1-2%5	28-01-2021	Tracción	M2-2%5	26-01-2021	Compresión
M1-2%6	28-01-2021	Reserva	M2-2%6	26-01-2021	Reserva

Tabla 3.12: Probetas cilíndricas (continuación).

<b>Probeta</b>	<b>Fecha elaboración</b>	<b>Ensayo</b>
M3-SF1	21-01-2021	Tracción
M3-SF2	21-01-2021	Reserva
M3-SF3	21-01-2021	Tracción
M3-SF4	21-01-2021	Reserva
M3-SF5	21-01-2021	Compresión
M3-SF6	21-01-2021	Compresión
M3-1.23%1	27-01-2021	Tracción
M3-1.23%2	26-01-2021	Reserva
M3-1.23%3	27-01-2021	Compresión
M3-1.23%4	26-01-2021	Compresión
M3-1.23%5	26-01-2021	Tracción
M3-1.23%6	26-01-2021	Reserva
M3-2%1	27-01-2021	Reserva
M3-2%2	27-01-2021	Reserva
M3-2%3	27-01-2021	Tracción
M3-2%4	27-01-2021	Tracción
M3-2%5	27-01-2021	Compresión
M3-2%6	27-01-2021	Compresión

Tabla 3.13: Viguetas prismáticas

<b>Probeta</b>	<b>Fecha elaboración</b>
VM1-SF1	19-01-2021
VM1-SF2	19-01-2021
VM2-SF1	25-01-2021
VM2-SF2	25-01-2021
VM2-2%1	26-01-2021
VM2-2%2	26-01-2021
VM3-SF1	26-01-2021
VM3-SF2	26-01-2021
VM3-2%1	12-03-2021
VM3-2%2	12-03-2021
VM1-2%1	19-03-2021
VM1-2%2	19-03-2021

Tabla 3.14: Vigas de hormigón armado.

<b>Probeta</b>	<b>Fecha elaboración</b>
VC-SF	18-05-2021
VC-2%	18-05-2021
VL-SF	18-05-2021
VL-2%	18-05-2021

# CUARTO CAPÍTULO

## 4. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción directa, compresión y flexión, así como procedimiento llevado a cabo en cada uno de estos. Además, se realiza un análisis de los datos obtenidos y se explican las decisiones tomadas durante el transcurso de esta etapa de la memoria.

### 4.1. Ensayos a tracción directa

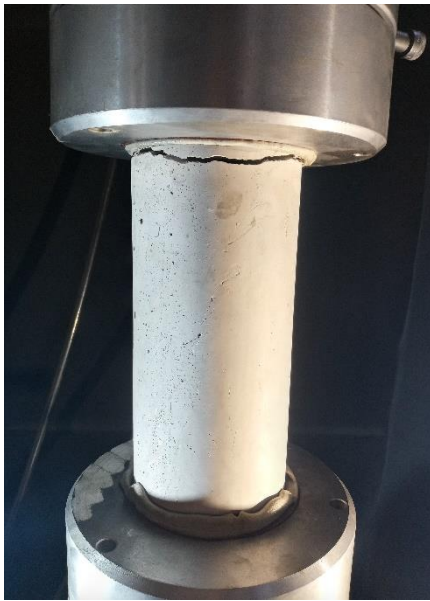
En estudios anteriores ([22], [28]), no se pudieron obtener datos consistentes respecto al ensayo de tracción directa, debido a diversos fallos ocasionados al momento de los ensayos, por ejemplo: el desalineamiento de las placas adheridas a las probetas, generando planos de falla a torsión; errores de la maquina universal al momento de medir pequeñas deformaciones y algunas probetas fallando en los bordes donde encuentra el adhesivo epóxico.

Debido a los antecedentes mencionados, se decide realizar pruebas preliminares para el ensayo de tracción, con el fin de corregir los errores y obtener resultados consistentes.

#### 4.1.1. Pruebas preliminares

En primera instancia, se realizaron pruebas para verificar el correcto funcionamiento de los nuevos dispositivos a tracción, utilizando probetas ya existentes en el laboratorio. Se observó que no se formaban planos de falla torsionales, ya que la barra cilíndrica que es sujeta por las mordazas queda libre dentro de las placas (Anexo B1), lo que soluciona el problema de desalineamiento y evita el giro en la probeta al momento de la compresión de mordazas.

Sin embargo, la mayoría de las probetas fallaban en los bordes (Figura 4.1(a)). Se decide usar una mayor cantidad de epóxico, agregando cierta cantidad en la superficie cilíndrica de la probeta cercana a los extremos, cubriendo a lo menos 1 cm, como se observa en la Figura 4.1(b). La mayoría de estas muestras fallaron de la forma esperada (Figura 4.1(b)) y las pocas que continuaban fallando en los extremos, se aprecia el contenido de hormigón en ambas placas, lo que indicaba una falla dentro de la probeta y no una falla del epóxico (Figura 4.1(c)). Además, los resultados de la tensión máxima fueron consistentes a pesar del tipo de falla. (Anexo C.1)



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: Falla en el extremo (a), falla esperada y cantidad de epóxico (b) y presencia de hormigón en fallas en los bordes (c).

El problema más importante que se debía resolver era la medición de la deformación en la probeta, sobre todo en la etapa de pre-fisuración, donde los desplazamiento son muy pequeños. Al utilizar el montaje observado en la Figura 3.11, los desplazamiento medidos por la maquina universal eran mayores a lo que se encuentra en la literatura, obteniendo valores para la rigidez del orden de 1000 MPa, muy por debajo del valor típico que es de 20000 MPa aproximadamente. Se decide utilizar un sensor LVDT, con el vástago midiendo en la placa inferior, como se ve en el montaje de la Figura 4.2(a), obteniendo mejores resultados, pero no fueron totalmente consistentes, ya que se registraban valores de rigidez cercanas a los 10000 MPa. Finalmente se opta por usar dos sensores LVDT adheridos a la probeta, con el vástago midiendo en un trozo de madera también pegado a la probeta (Figura 4.2(b)). El hecho de que los trozos de madera estén pegados a la probeta no generó cambios en las tensiones máximas y los datos de desplazamiento, que se obtienen del

promedio de ambas mediciones de los sensores, fueron más confiables que los datos anteriores. Se decide usar esta configuración como al definitiva, asegurándose de que el vástago mida perfectamente y no quede atascado dentro del sensor.

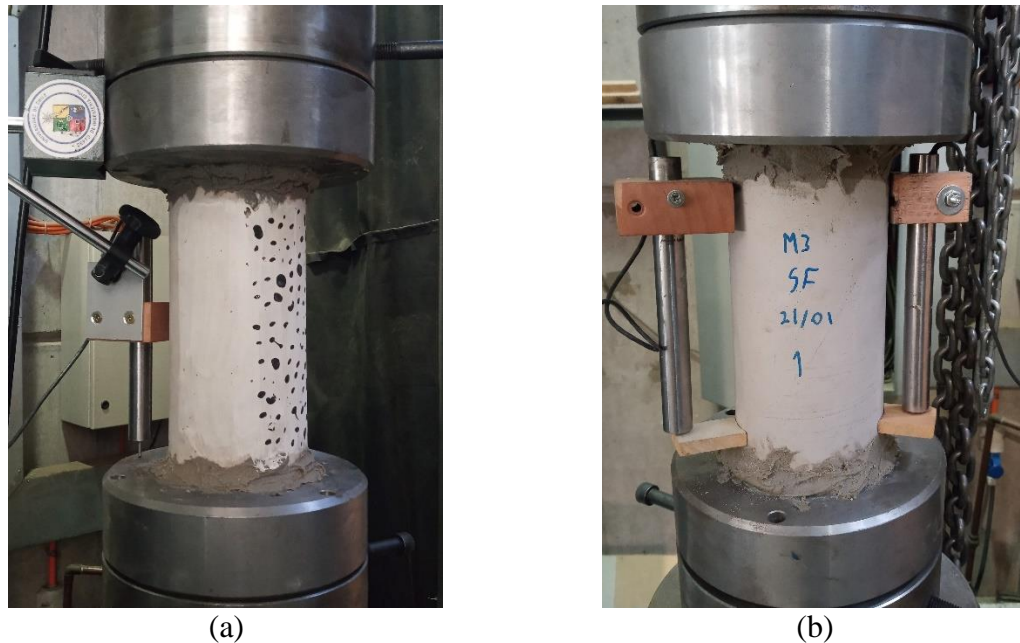


Figura 4.2: Disposición de los sensores LVDT: Montaje de prueba (a) y montaje definitivo (b).

Los resultados obtenidos en esta etapa se presentan con mayor detalle en el Anexo C.1.

#### 4.1.2. Resultados ensayos a tracción directa

Los ensayos a tracción fueron realizados con una velocidad de 0.5 mm/min, con la maquina universal programada para culminar el ensayo cuando la carga haya decaído en un 80% respecto a la carga máxima y todas las probetas tenían más de 180 días de fraguado. En cuanto a la configuración de la curva tensión-deformación, se utilizan los datos de los sensores LVDT para la etapa de pre-fisuración y para la etapa post fisuración se usan los datos obtenidos desde la maquina universal. En la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos y en las Figura 4.3-4.5 se observan las curvas medidas por los sensores LVDT y la maquina universal.

Tabla 4.1: Resultados ensayos a tracción directa.

Mezcla	Probeta	$f'_t$ [MPa]	$\epsilon_{cr}$ [mm/mm]	$\epsilon_{ut}$ [mm/mm]	Energía post fisuración [J]	$E_c$ [MPa]
"M1"	M1-SF3	2.19	0.00011	0.00011	-	26246
	M1-SF6	2.20	0.00010	0.00010	-	29593
	M1-1.23%1	2.31	0.00012	0.00117	1.33	23562
	M1-1.23%2	2.70	0.00014	0.00169	2.79	29516
	M1-2%4	2.02	0.00025	0.00312	4.99	24889
	M1-2%5	2.21	0.00011	0.00337	4.63	28934
"M2"	M2-SF2	1.56	0.00013	0.00013	-	21687
	M2-SF3	1.72	0.00011	0.00011	-	16845
	M2-1.23%2	1.71	0.00017	0.00296	3.79	17459
	M2-1.23%3	2.25	0.00015	0.00242	3.60	18568
	M2-2%2	2.32	0.00010	0.00410	6.37	24743
	M2-2%3	2.73	0.00012	0.00322	7.57	25837
"M3"	M3-SF1	0.97	0.00008	0.00009	-	12164
	M3-SF3	0.81	0.00008	0.00031	0.19	12865
	M3-1.23%1	1.69	0.00015	0.00334	5.06	15935
	M3-1.23%5	2.09	0.00016	0.00224	4.12	19464
	M3-2%3	1.68	0.00013	0.00522	6.66	15572
	M3-2%4	2.50	0.00016	0.00462	9.63	16552

$f'_t$ : Tensión máxima a tracción.

$\epsilon_{cr}$ : Deformación en el peak de tensión.

$\epsilon_{ut}$ : Deformación ultima a tracción.

$E_c$ : Modulo de Elasticidad

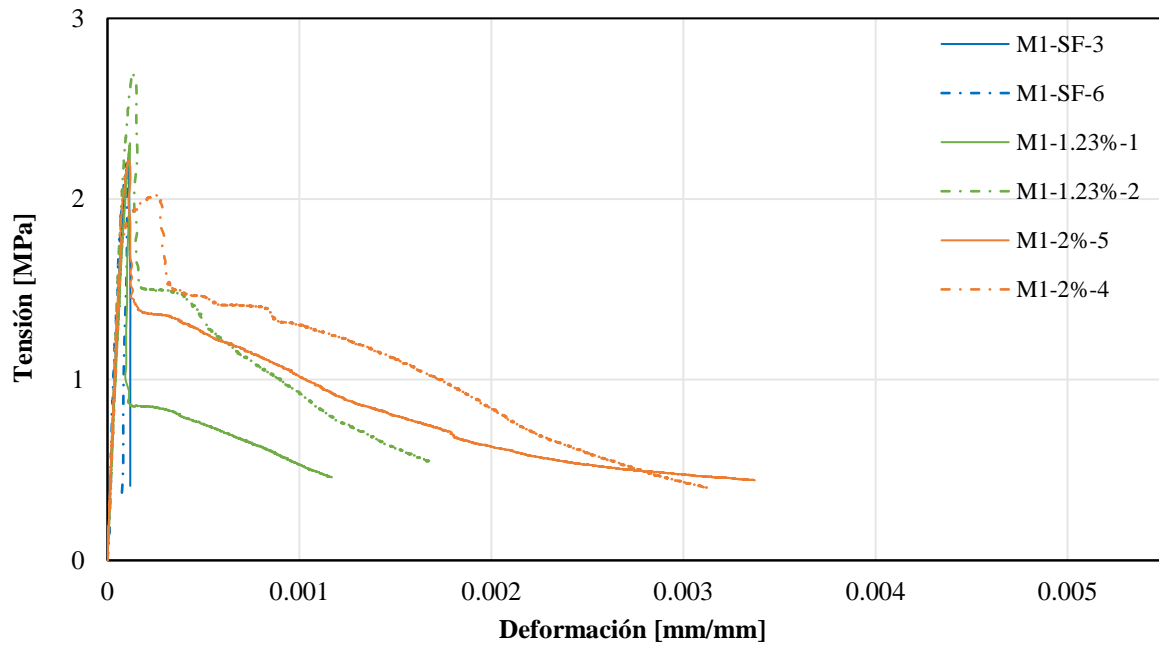


Figura 4.3: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido grueso M1.

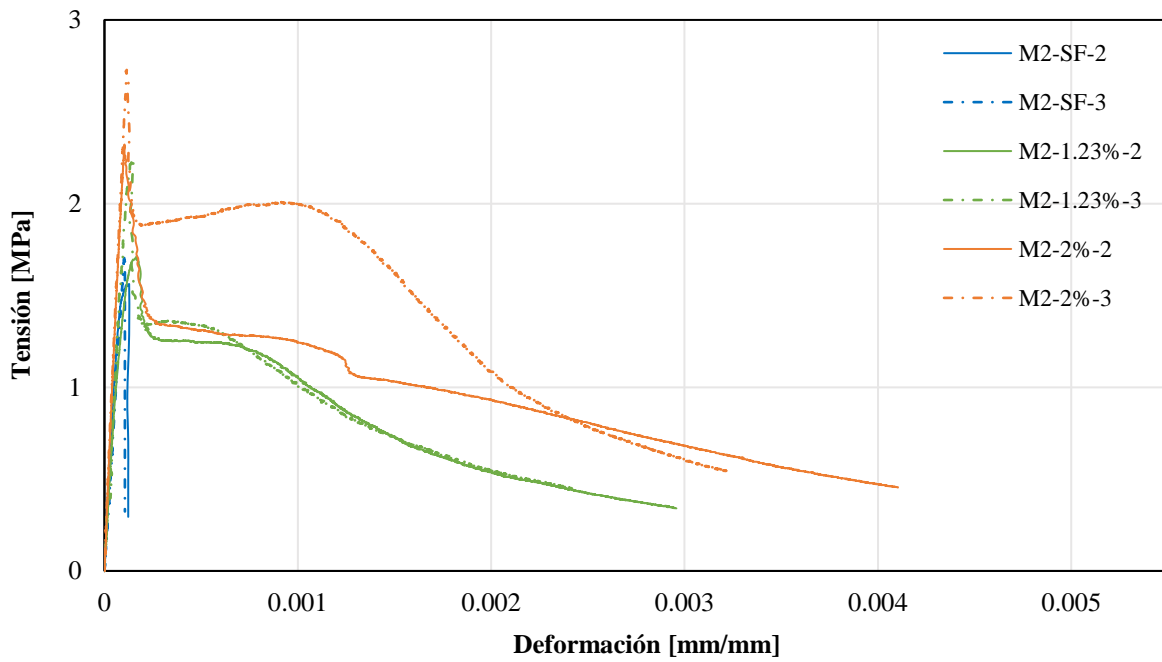


Figura 4.4: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido intermedio M2.



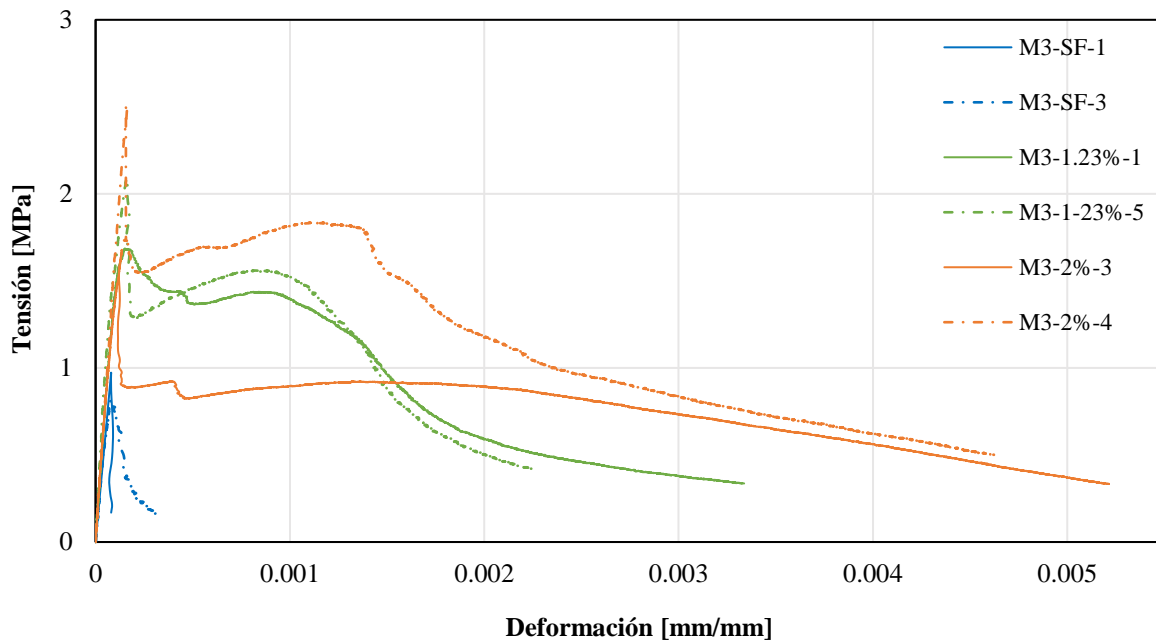


Figura 4.5: Curvas ensayo a tracción directa para mezclas de árido fino M3.

Se puede apreciar un notorio aumento en la tensión máxima de tracción para las muestras de M2 y M3 (Figuras 4.4 y 4.5) a medida que aumenta la cantidad de fibra. En el caso de M1 (Figura 4.3), se ve un aumento del 13% para las muestras con 1.23% de fibra en comparación con las muestras sin fibra y con 2% de fibra, ya que estas últimas soportaron tensiones similares. En el caso de M3, la adición de 2% de fibra incremento la tensión máxima en más del doble en comparación a probetas sin fibra, llegando a igualar en capacidad a mezclas con árido más grueso. Lo mismo para M2, que logra aumentar en más de un 50% la tensión máxima de las probetas con 2% de fibra respecto a las sin fibra.

En relación con la ductilidad de la probeta, en los tres tipos de mezcla se observa un incremento a medida que aumenta el volumen de la fibra, obteniendo una mayor elongación en las probetas de árido fino (M3), llegando hasta un 0.0049 de deformación promedio en las muestras con un 2% de fibra, un 75% mayor en comparación a las muestras con 1.23% de fibra y aproximadamente 24 veces mayor a la deformación de muestras sin fibra. En el caso de M2, la deformación máxima promedio fue de 0.0037 para un 2% de fibra, superando en un 37% a las muestras con 1.23% de fibra y 30 veces mayor que las probetas sin fibra. Y para las muestras de M1, se llega a una deformación promedio de 0.0033 con un 2% de fibra, doblando en deformación a las probetas con 1.23% de fibra y 32 veces mayor que las muestras sin fibra. También se puede apreciar un leve comportamiento dúctil en la probeta M3-SF-3 (Figura 4.5), a pesar de no tener fibras.

En la Tabla 4.1 también se tienen los resultados de la energía absorbida durante la etapa posterior a la fisuración, donde se observa un aumento de la energía en las probetas con mayor cantidad de fibra, sobre todo en las muestras de M3, llegando a una energía de 9.63 J en la probeta M3-2%-4, que se ve plasmado en su curva de tensión-deformación (Figura 4.5) en el aumento de

la tensión posterior a la caída debido a la fisuración. Este tipo de respuesta se observa en todas las probetas de M3 con fibra y en las muestras de M2 (Figura 4.4) con una menor intensidad. En la Figura 4.6 se aprecia la distribución de fibras por cada tipo de mezcla, en donde se ve una mejor distribución en M3 (Figura 4.6(c)), abarcando toda la cara de la probeta con fibras, lo que genera una respuesta más dúctil. No así en la probeta de M1 (Figura 4.6(a)) donde el material granular ocupa un mayor espacio, impidiendo una buena distribución de la fibra en la probeta.

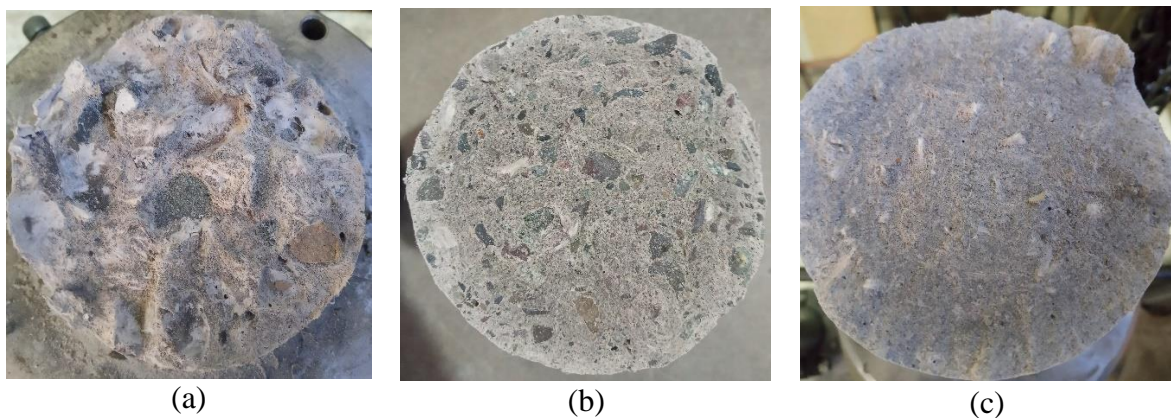


Figura 4.6: Distribución de la fibra dentro de la matriz de hormigón para (a) M1, (b) M2 y (c) M3.

## 4.2. Resultados ensayos a compresión

Se realizan ensayos a compresión para tener una buena caracterización de cada mezcla. Se utilizó un par de anillos que servían de soporte para los sensores LVDT, como se ve en la Figura 3.12. Al igual que en los ensayos de tracción directa, la curva de tensión-deformación será constituida por los valores entregados por los sensores LVDT, hasta el peak de tensión máxima. Luego, para la etapa residual de la curva, se utilizan los datos entregados por la maquina universal. Los ensayos se realizaron a una velocidad de 0.5 mm/min y culminan una vez haya decaído la carga máxima en un 80%. Todas las probetas ensayadas tenían más de 200 días de fraguado.

Los resultados de los ensayos a compresión se presentan en la Tabla 4.2, mientras que las curvas tensión-deformación se observan en las figuras 4.7-4.9.

Tabla 4.2: Resultados de ensayos a compresión.

Mezcla	Probeta	$f'_c$ [MPa]	$\epsilon_{cr}$ [mm/mm]	$\epsilon_{uc}$ [mm/mm]	$E_c$ [MPa]
"M1"	M1-SF1	29.72	0.0014	0.0065	23099
	M1-SF2	40.13	0.0031	0.0042	19574
	M1-1.23%3	35.86	0.0028	0.0238	18004
	M1-1.23%4	30.54	0.0026	0.0379	22326
	M1-2%2	33.83	0.0041	0.0380	13752
	M1-2%3	36.12	0.0021	0.0272	27379
"M2"	M2-SF4	26.05	0.0032	0.0135	15381
	M2-SF5	23.81	0.0028	0.0119	12420
	M2-1.23%4	24.02	0.0045	0.0434	10763
	M2-1.23%5	26.41	0.0032	0.0218	11422
	M2-2%4	27.15	0.0038	0.0318	11014
	M2-2%5	29.15	0.0024	0.0362	25371
"M3"	M3-SF5	21.83	0.0033	0.0086	12043
	M3-SF6	16.98	0.0027	0.0163	11503
	M3-1.23%2	20.69	0.0025	0.0546	14449
	M3-1.23%3	20.68	0.0038	0.0545	14040
	M3-2%5	21.43	0.0032	0.0393	12529
	M3-2%6	23.28	0.0051	0.0585	9249

$f'_c$ : Tensión máxima a compresión.

$\epsilon_{uc}$ : Deformación ultima a compresión.

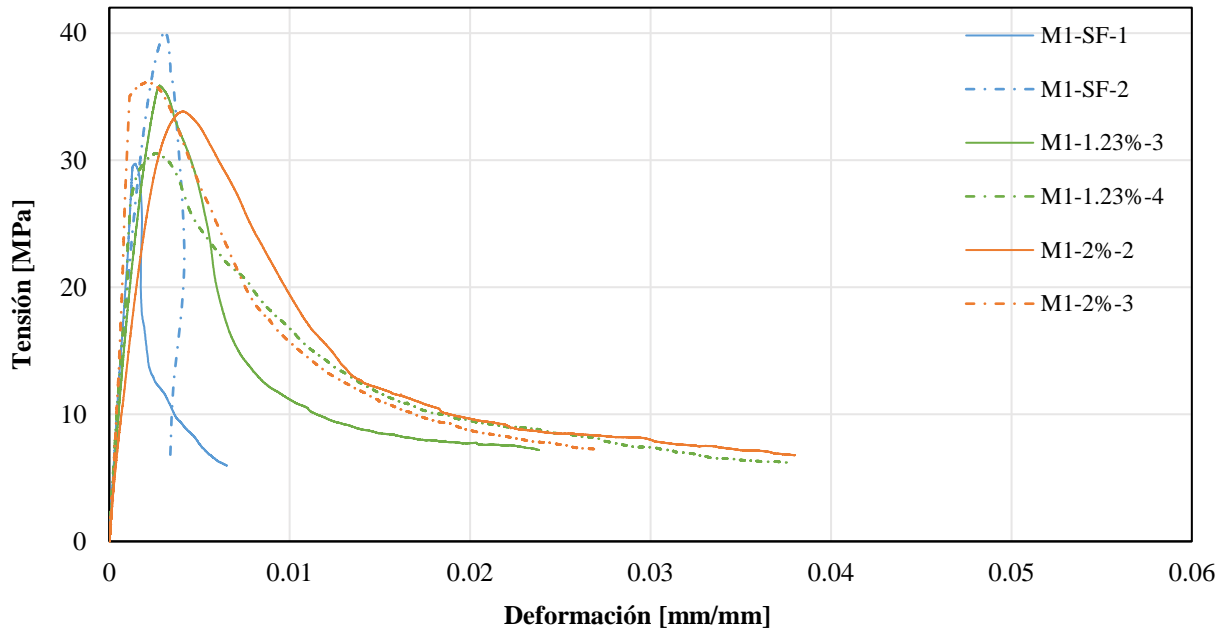


Figura 4.7: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido grueso M1.

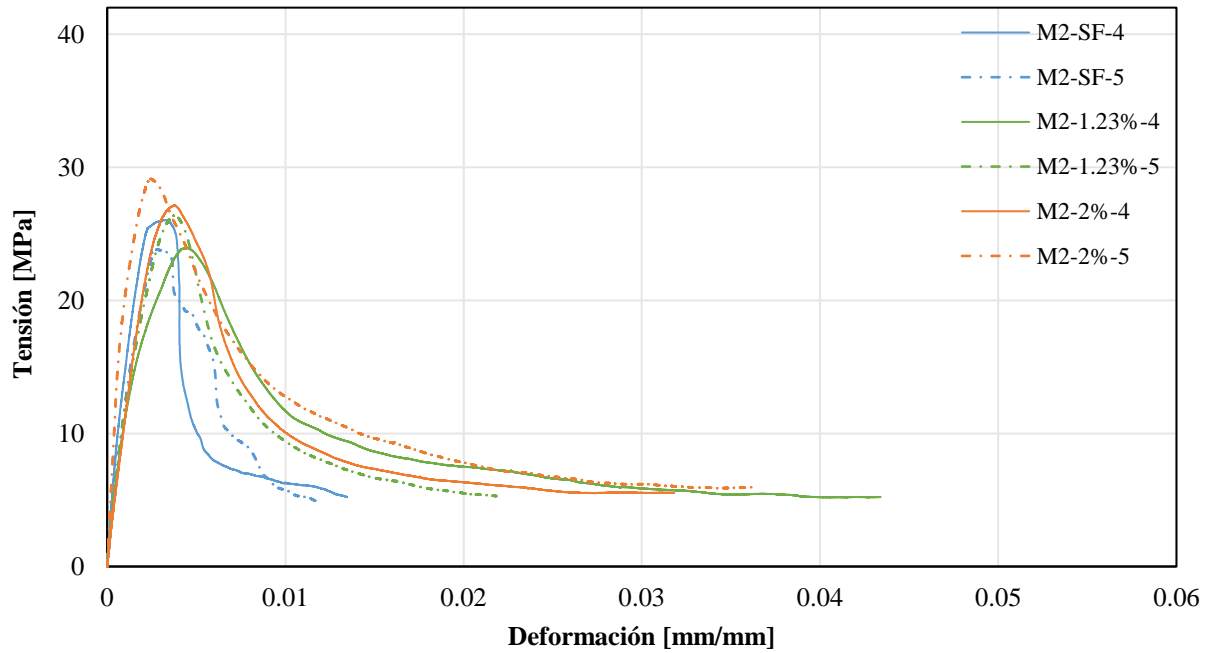


Figura 4.8: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido intermedio M2.

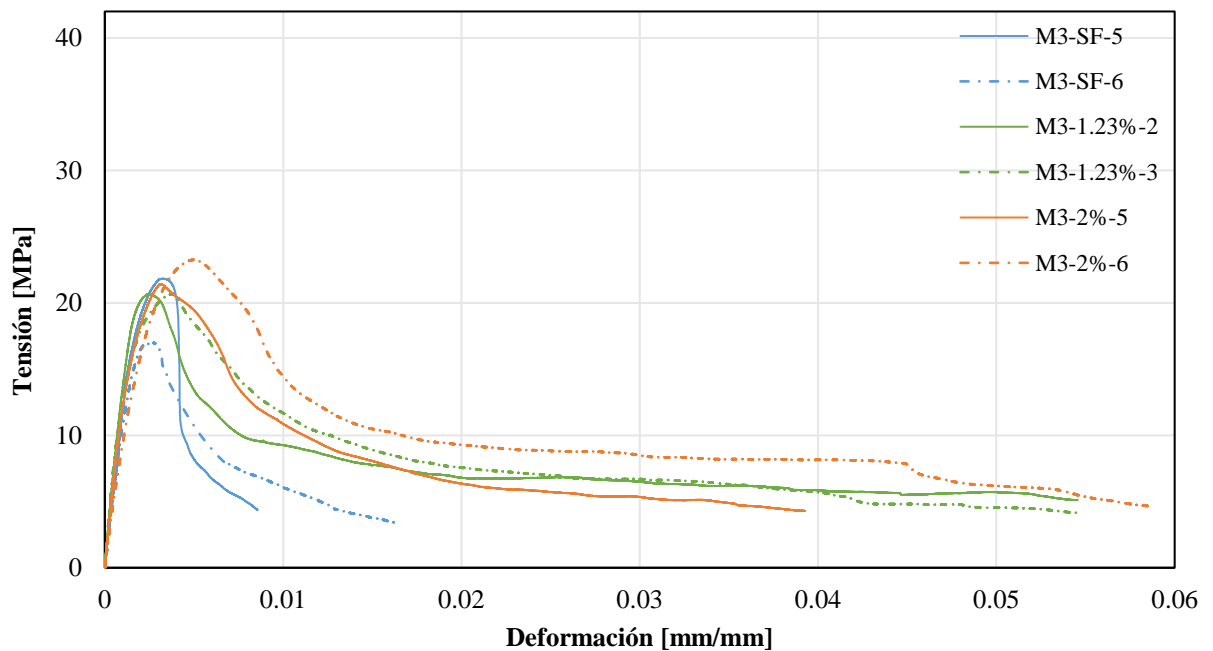


Figura 4.9: Curvas ensayo a compresión para mezclas de árido fino M3.

La adición de fibras no genera una gran variación en la resistencia a compresión dentro de cada mezcla. Si se aprecia una mayor resistencia en las probetas de M1 con respecto a M2 y M3, debido a la dosificación del agregado grueso (Tabla 4.2). En las muestras de M1 la tensión máxima

es en promedio de 34 MPa, con una mayor variabilidad en las probetas sin fibras. Para M2, se tiene un aumento de resistencia del 10% y del 13% en las muestras con 2% de fibra con respecto a las de 1,23% y las sin fibra respectivamente. En el caso de M3, las probetas con 2% de fibra fueron en promedio un 8% mayor que las de 1.23% de fibra y un 15% mayor que las muestras sin fibra.

Como se puede observar en las Figuras 4.7-4.9, la adición de fibras aumentó considerablemente la deformación máxima en las probetas con respecto a las muestras sin fibras, con mejores resultados en M3, donde se logró una deformación del 5.8%. Además, se aprecia en las probetas con fibra una disminución en la tasa de caída de tensión en la etapa de post-fisuración, a diferencia de las probetas sin fibra, en donde el esfuerzo decae bruscamente luego del agrietamiento. A pesar de estos resultados, no se puede establecer en ninguna de las mezclas que las probetas con 2% de fibra lograron una mejor ductilidad en comparación con las muestras de 1.23% de fibra.

En la Figura 4.10 se muestra el modo de falla en las probetas durante el ensayo a compresión. Este tipo de falla ocurrió tanto en probetas con y sin fibra y corresponde a fisuras verticales encolumnadas que comienzan desde la parte superior del cilindro.



Figura 4.10: Modo de falla de probetas en ensayo a compresión.

### 4.3. Resultados ensayos a flexión de viguetas

Los ensayos a flexión se realizaron en la maquina universal Instron® modelo 600LX, donde se montaron las piezas metálicas diseñadas para el ensayo (Figura 3.10). Al igual que los ensayos anteriores, la velocidad empleada en los ensayos fue de 0.5 mm/min y se terminan luego de un decaimiento del 80% de la carga máxima. Todas las viguetas tenían más de 180 días de fraguado.

Se sabe que la maquina universal no entrega datos confiables de desplazamiento en la etapa de pre-fisuración, por lo que se decide colocar sensores LVDT en ambos costados de la probeta en el punto medio, como se ve en la Figura 4.11.

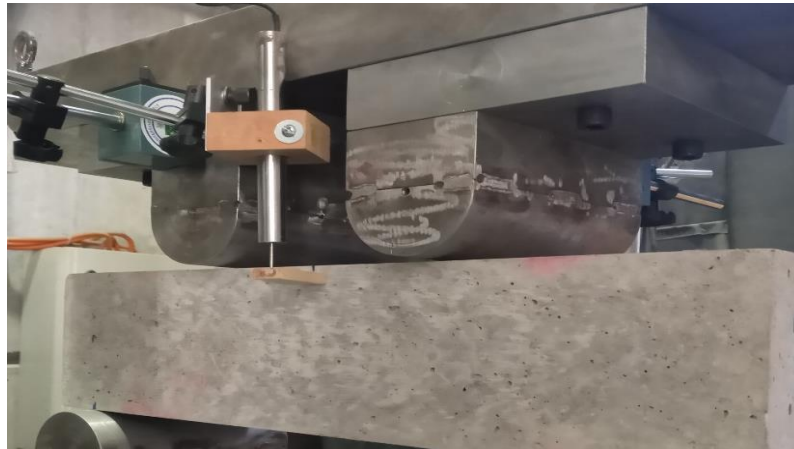


Figura 4.11: Montaje sensor LVDT.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos a flexión y en las Figuras 4.12-4.14 se observan las curvas obtenidas, donde los datos extraídos de los sensores LVDT son utilizados para la etapa de pre-fisuración y los datos de la maquina universal se utilizan en la respuesta posterior al agrietamiento.

Tabla 4.3: Resultados ensayos a flexión en viguetas.

Mezcla	Vigüeta	Carga máxima [kgf]	$\delta_{cr}$ [mm]	$\delta_u$ [mm]	$f'_f$ [MPa]	$E_c$ [MPa]
"M1"	VM1-SF-1	2901.59	0.0642	0.0642	3.79	21172
	VM1-SF-2	3219.11	0.0711	0.0711	4.21	20263
	VM1-2%-1	3520.55	0.0621	1.5501	4.60	28369
	VM1-2%-2	3587.43	0.0739	1.7759	4.69	21465
"M2"	VM2-SF-1	2224.44	0.0521	0.0521	2.91	20480
	VM2-SF-2	2308.44	0.0567	0.0567	3.02	19521
	VM2-2%-1	3344.73	0.1181	1.4551	4.37	16106
	VM2-2%-2	3914.17	0.1254	1.7204	5.12	20587
"M3"	VM3-SF-1	1245.24	0.0411	0.0811	1.63	14521
	VM3-SF-2	1390.49	0.0431	0.0431	1.82	15480
	VM3-2%-1	2311.13	0.0655	1.9515	3.02	14506
	VM3-2%-2	2568.00	0.1783	1.4743	3.36	18276

$\delta_{cr}$ : Deflexión en el peak de carga.

$\delta_u$ : Deflexión ultima.

$f'_f$ : Tensión de agrietamiento a flexión.

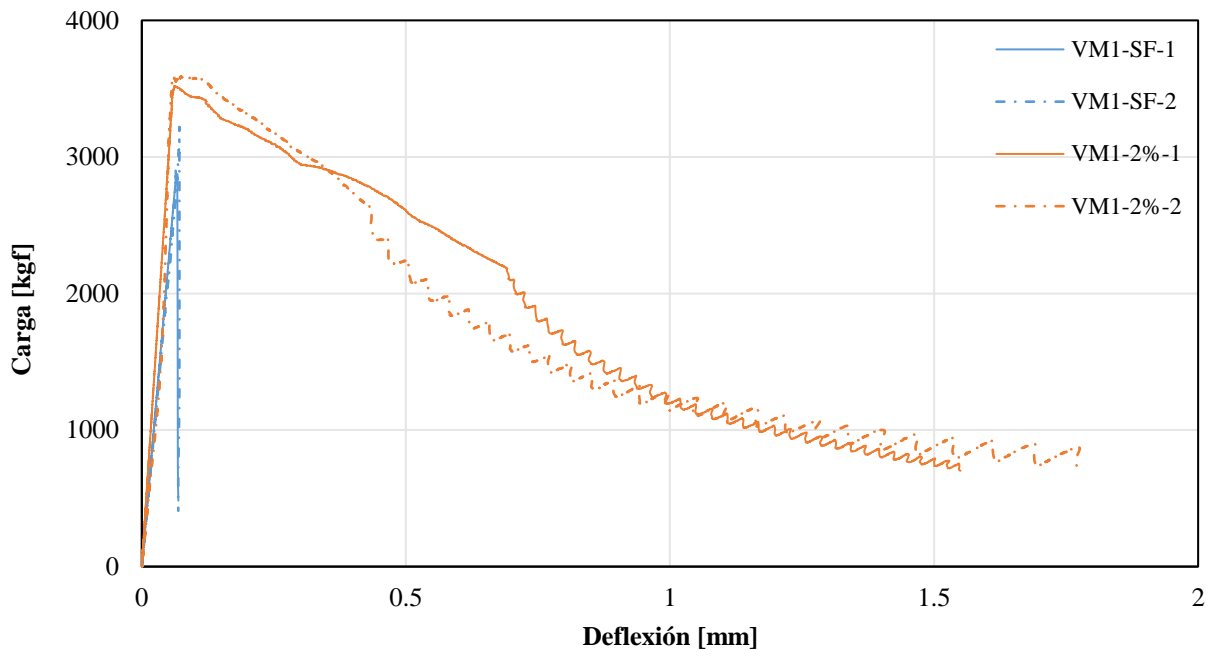


Figura 4.12: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido grueso M1.

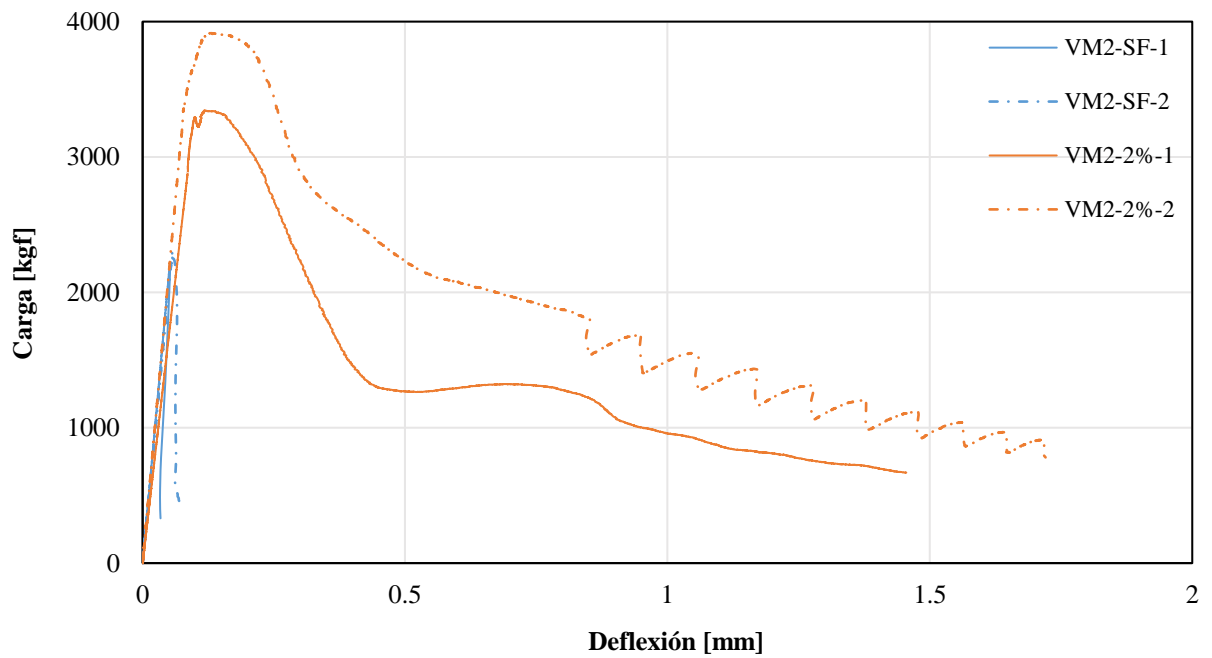


Figura 4.13: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido intermedio M2.

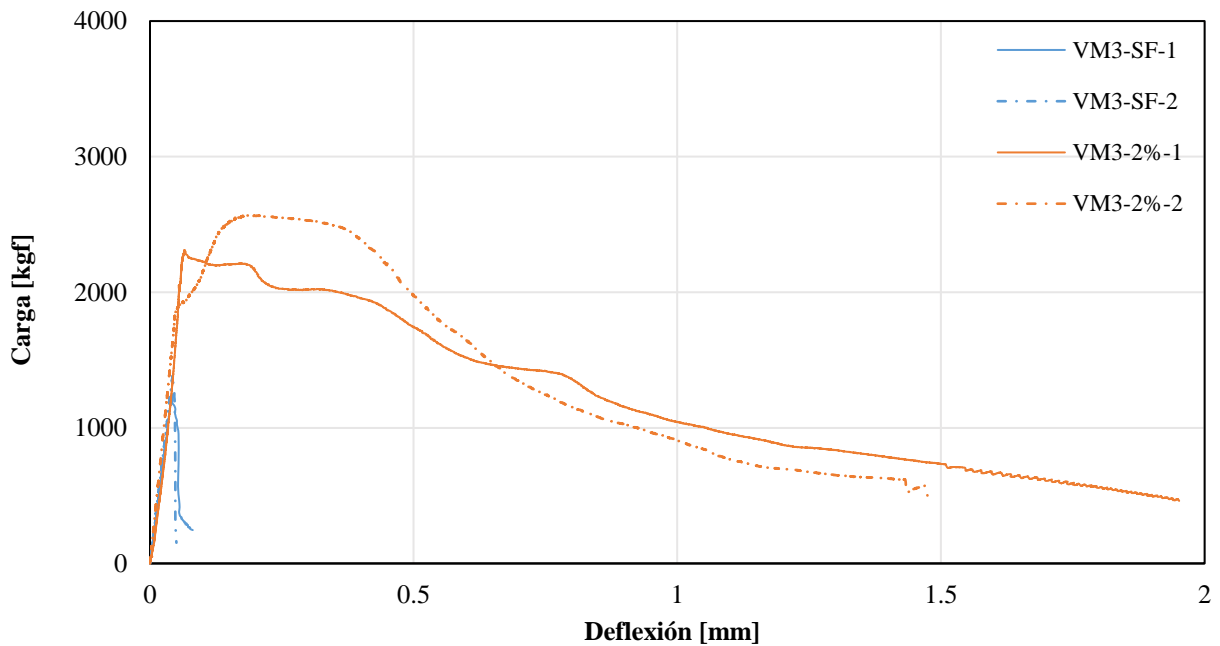


Figura 4.14: Curvas ensayo a flexión de viguetas para mezclas de árido fino M3.

De acuerdo con los resultados entregados, se observa un aumento en la carga máxima soportada en las viguetas con fibras por sobre las muestras sin fibra, sobre todo para M2 y M3, en donde se obtuvo un aumento del 60% y 85% en promedio por sobre las muestras sin fibras. En el caso de M1, el aumento fue menor en las viguetas con 2% de fibra, superando en un 16% a las muestras sin fibra. Además, se presentan los valores de tensiones máximas ( $f'_f$ ) para parte inferior de la sección en el punto medio de la viga (Tabla 4.3), en donde la presencia de fibra produce un aumento del esfuerzo máximo en comparación con las muestras sin fibras, en las mismas proporciones mencionadas anteriormente para cada mezcla.

También se observa una respuesta dúctil en cuanto a deflexión (Figuras 4.12-4.14), sin grandes diferencias entre las mezclas, llegando a 1.71 mm en promedio para las viguetas de M3, seguido de M1 con 1.66 mm y M2 con una deflexión promedio de 1.59 mm en las muestras con 2% de fibra. Además, las muestras con fibras logran una mayor deflexión en la etapa de pre-fisuración en el caso de M3 y M2, no así en las viguetas de M1. Esta ductilidad se logra gracias al trabajo realizado por la fibra una vez ocurrido el agrietamiento, observándose un efecto de puente dentro de la grieta, como se muestra en la Figura 4.15. Otro fenómeno que se pudo observar fue el de una respuesta ondulatoria en la carga en la parte final de la etapa de post-fisuración, con oscilaciones más pequeñas en M3. Este aumento y disminución de carga refleja la rotura de las fibras a medida que se expande la grieta a través de la viga.



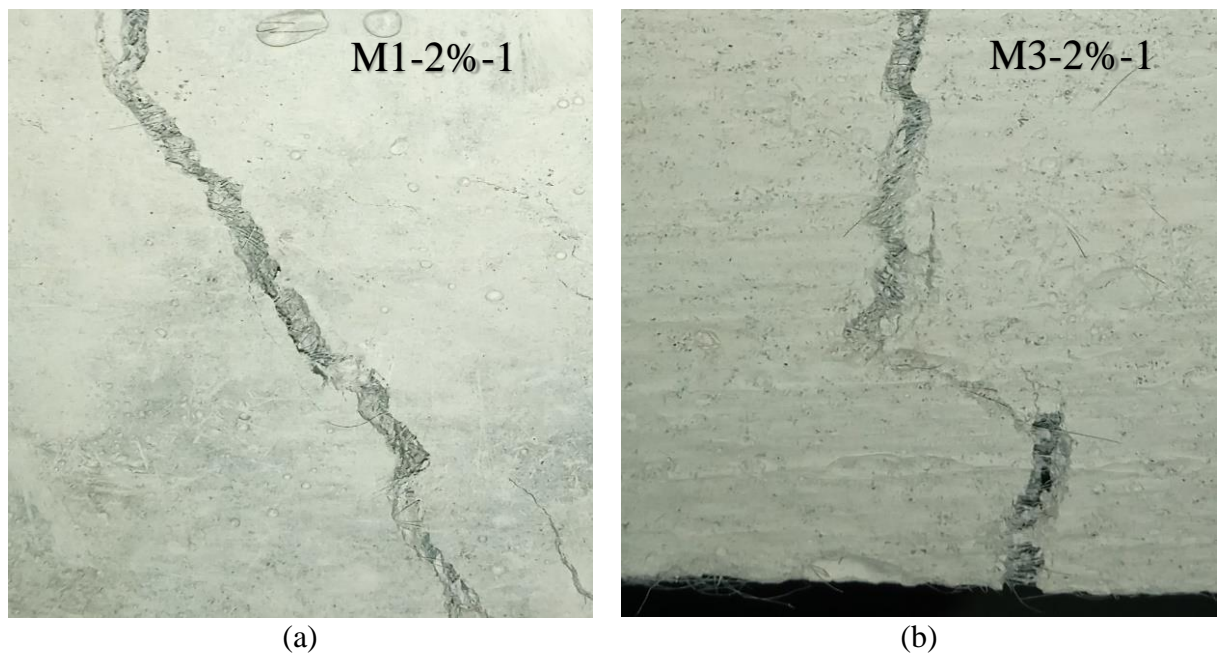


Figura 4.15: Efecto de puente dentro de la grieta vista por (a) debajo y (b) por un costado de la vigueta.

La falla presentada en las viguetas fue de una sola grieta ubicada entre los puntos de carga, lo que indica que las probetas fallaron a flexión y no en corte. Este tipo de falla, que se observa en la Figura 4.16(a) y (b), estuvo presente en las muestras de M1 y M2, tanto para viguetas con y sin fibras; y en M3 para las muestras sin fibra. Sin embargo, en el caso de las viguetas con 2% de fibra de M3, se pudo observar más de una grieta durante el ensayo, como se aprecia en la Figura 4.16(c), específicamente dos grietas en VM3-2%-1 y tres grietas en VM3-2%-2.

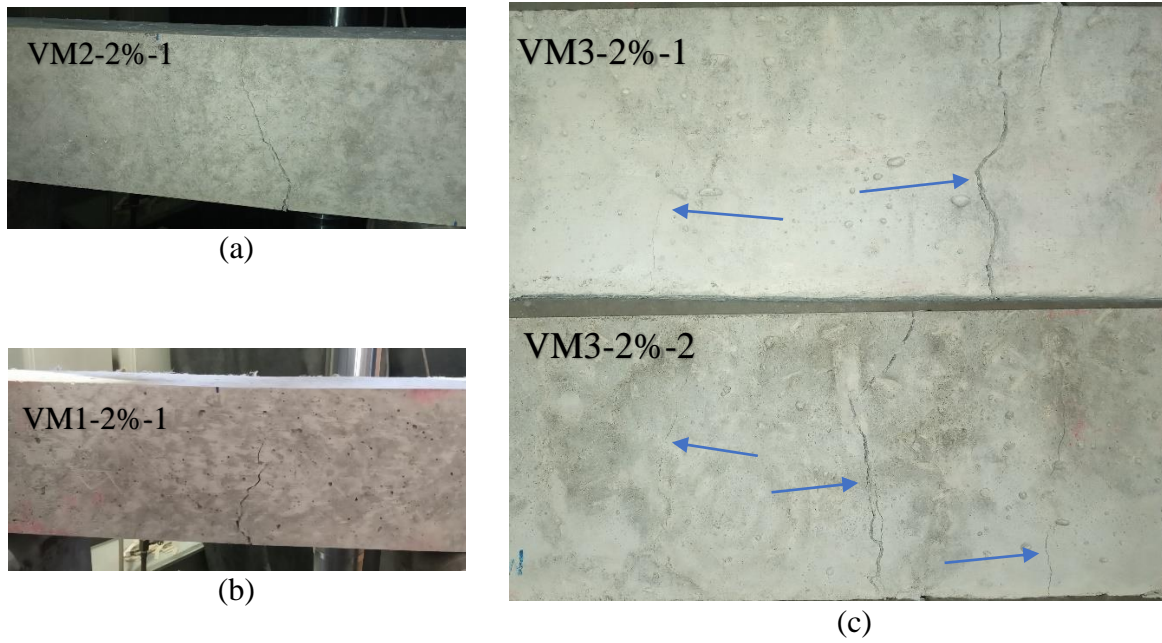


Figura 4.16: Formación de grietas en las muestras.

#### 4.4. Análisis de resultados entre ensayos

Con el fin de hacer una comparación del comportamiento del hormigón con y sin fibras entre los ensayos efectuados, en la Tabla 4.4 se entregan los datos de las tensiones máximas en promedio obtenidos en cada ensayo según el tipo de mezcla, que se comparan en los gráficos de la Figura 4.17.

Tabla 4.4: Resultados promedio de tensiones máximas por cada tipo de muestra.

Mezcla	Volumen de fibra [%]	$f'_c$ [MPa]	$f'_t$ [MPa]	$f'_f$ [MPa]
"M1"	Sin fibra	34.92	2.19	4.00
	1.23	33.20	2.50	-
	2	34.97	2.12	4.65
"M2"	Sin fibra	24.93	1.64	2.96
	1.23	25.22	1.98	-
	2	28.15	2.52	4.75
"M3"	Sin fibra	19.40	0.89	1.72
	1.23	20.69	1.89	-
	2	22.35	2.09	3.19

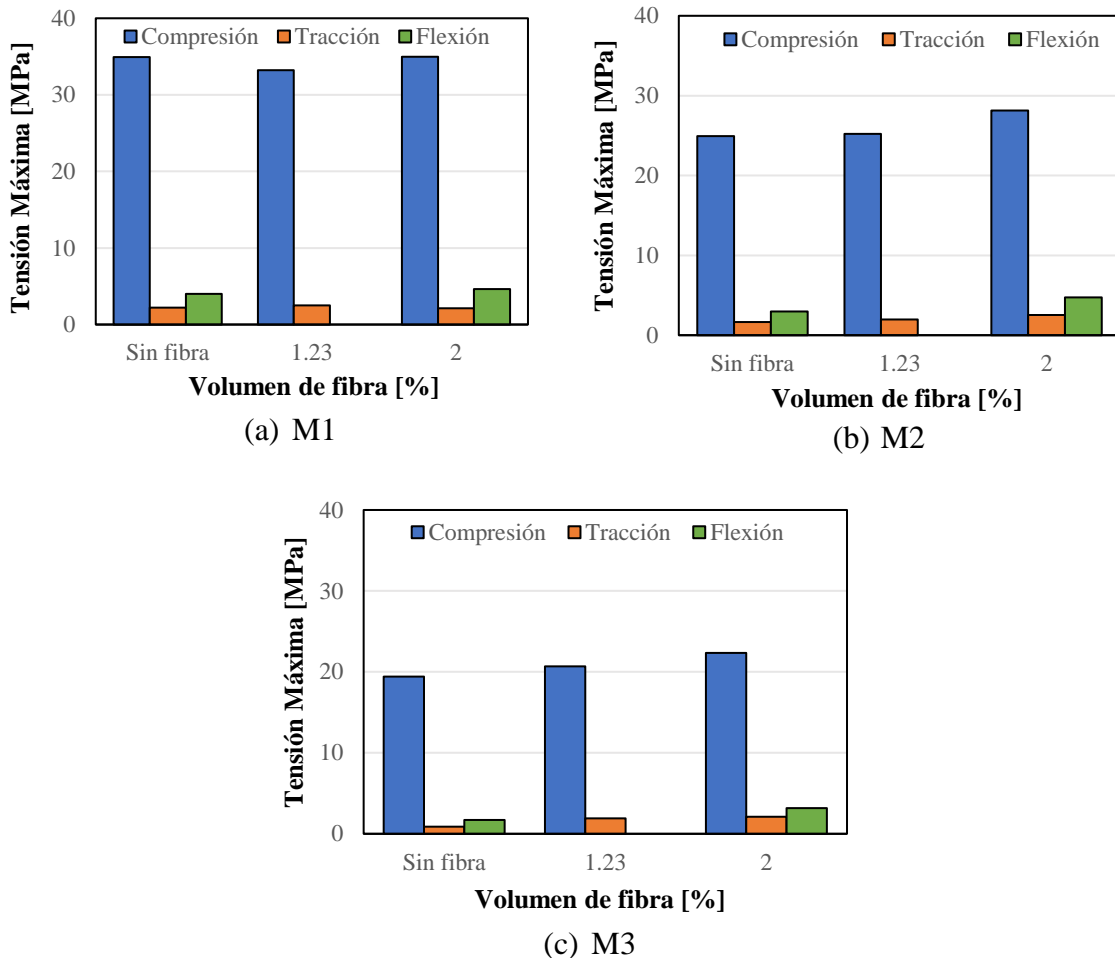


Figura 4.17: Comparación del promedio de tensiones máximas obtenidas en cada ensayo según el volumen de fibra en (a) M1, (b) M2 y (c) M3.

En las muestras de M1 (Figura 4.17(a)) la resistencia a tracción directa corresponde a un 6.3%, 7.5% y 6.1% de la resistencia máxima a compresión, para las probetas sin fibra, con 1.23% y 2% de fibras respectivamente. En el caso del esfuerzo máximo a flexión, este fue un 80% mayor para probetas sin fibra y más del doble en muestras con 2% de fibra en comparación con los resultados del ensayo a tracción directa.

En el caso de M2 (Figura 4.17(b)) el porcentaje de tensión máxima obtenida a tracción directa con respecto al ensayo a compresión para las muestras de 2%, 1.23% y sin fibra fue de 9%, 7.9% y 6.6% respectivamente. Mientras que el esfuerzo a tracción por flexión fue mayor en poco más de un 80% para ambos tipos de muestra en comparación a la resistencia de tracción directa.

En M3 (Figura 4.17(c)) se obtuvo una resistencia a tracción en las muestras con fibras (1.23% y 2%) de poco más del 9% con respecto al ensayo de compresión, mientras que en la muestra sin fibra esta relación fue de un 4.6%. En el caso del esfuerzo a flexión respecto al ensayo de tracción directa, este fue casi el doble en la muestra sin fibra y poco más del 50% en la probeta con 2% de fibra.

La asociación internacional RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) en una de sus publicaciones sobre de ensayos de viguetas de hormigón reforzados con fibras de acero [27], explica la forma de obtener una tensión característica a flexión según los resultados de las tensiones máximas a compresión. En la Tabla 4.5 se presentan los resultados comparando las tensiones a flexión experimentales y las obtenidas del documento.

Tabla 4.5: Comparación de tensiones experimentales y teóricos de la tensión a flexión.

Mezcla	Volumen de fibra [%]	Compresión [Mpa]	Flexión [Mpa]	Tensión característica [Mpa]
"M1"	Sin fibra	34.92	4.00	3.74
	2	34.97	4.65	3.74
"M2"	Sin fibra	24.93	2.96	2.99
	2	28.15	4.75	3.24
"M3"	Sin fibra	19.40	1.72	2.53
	2	22.35	3.19	2.78

Los resultados muestran una aproximación de los resultados experimentales con los teóricos, sobre todo en el caso sin fibra, ya que en las muestras con 2% de fibras la tensión a flexión experimental es mayor, sobre todo en M1 y M2. Aun así, los resultados experimentales no se escapan de los esperados y son consistentes.

#### 4.5. Resultados ensayos a flexión en vigas reforzadas con acero

Se realizaron dos ensayos de vigas de hormigón armado, con una distribución de armadura detalladas en las Figuras 3.14 y 3.15, diseñadas para fallar a corte (Viga corta) y flexión (Viga larga). El acero ocupado en las barras de refuerzo fue del tipo A630-420H, con un diámetro de 8 mm y sus propiedades se muestran en la sección 3.1.3. En el caso de hormigón utilizado, este fue del tipo M1 y al momento de confeccionar las vigas se prepararon cilindros para la caracterización de la mezcla, que fueron ensayados bajo las mismas condiciones que las probetas anteriores, luego de 100 días de fraguado, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.6 y la curva de tensión-deformación se observan en la Figura 4.18. En estos resultados se aprecia una baja en la resistencia máxima a compresión para M1, en comparación con los resultados obtenidos anteriormente, debido a problemas durante la realización de la mezcla, donde hubo una absorción de agua mayor a lo normal, quedando un mezcla seca y con mayor cantidad de aire. Aun así, fue posible confeccionar las vigas para la realización de los ensayos.

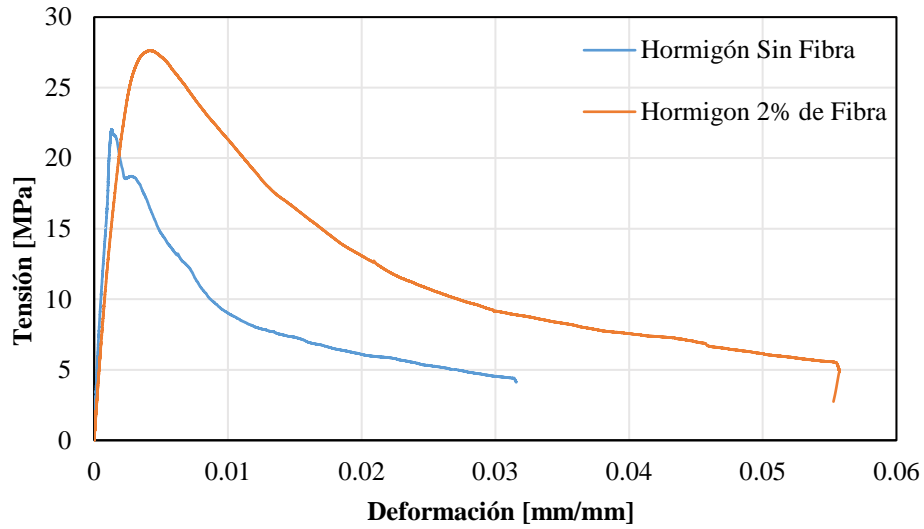


Figura 4.18: Curvas tensión-deformación de ensayos a compresión.

Tabla 4.6: Resultado ensayos a compresión.

Mezcla	$f'_c$ [MPa]	$\epsilon_{cr}$ [mm/mm]	$\epsilon_{uc}$ [mm/mm]	Módulo de elasticidad [MPa]
Sin Fibra	22.02	0.00131	0.0316	19359
2% de Fibra	27.64	0.00415	0.0557	12151

#### 4.5.1. Resultados sensor ultrasónico

La configuración de ensayo se muestra en la Figura 3.13 del capítulo anterior, donde se ocupa un sensor ultrasónico para medir el desplazamiento en la vigueta de carga. Las vigas fueron ensayadas luego de 120 días desde su confección.

Para efectos de comparación y garantizar que los resultados del ensayo sean consistentes, se realiza un análisis sobre la capacidad a flexión de las vigas largas y a corte para las vigas cortas, según la ACI 318-19 [1], de acuerdo con las características de los materiales utilizados, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.7, en donde se entrega la carga de agrietamiento y carga máxima teórica a soportar por la viga.

Tabla 4.7: Cargas teóricas de agrietamiento y máxima.

Viga	Carga de agrietamiento [kgf]	Carga ultima [kgf]
VC-SF	1574	4464
VC-2%	2234	4945
VL-SF	727	2837
VL-2%	1031	2840

Los resultados adquiridos desde la prensa de carga y el sensor ultrasónico se presentan en las Figuras 4.19 y 4.20. Para las vigas cortas, se alcanza una carga máxima de 6947 kgf y una deflexión de 1.32 cm para el caso sin fibra; y una carga máxima de 8982.9 kgf y una deflexión de 3.9 cm en la viga con 2% de fibra. En el caso de las vigas largas, se obtiene una carga máxima de 3562.8 kgf y una deflexión de 10.9 cm para la viga sin fibra; y una carga máxima de 3332.8 kgf y una deflexión de 11 cm en la viga con 2% de fibra.

Según la Figura 4.19, la viga corta con fibra supera en un 29% en cuanto a carga máxima a la viga sin fibra. Además, se observa una gran diferencia en la deflexión máxima obtenida, debido a que la viga corta con fibra tuvo una falla a flexión en vez de una falla a corte como se preveía. Este fenómeno se aprecia con mayor detalle en el análisis por fotogrametría.

Para el caso de vigas largas (Figura 4.20), ambas vigas mostraron prácticamente el mismo comportamiento. La viga sin fibra superó en un 6.5% de carga máxima a la viga con fibra, mientras que en deflexión máxima obtuvieron casi el mismo resultado, por lo que la adición de fibra no mejoro el comportamiento a flexión en la viga. Esto puede ser debido a espacios vacíos dentro de la matriz de hormigón, producidos por mala vibración y formación de nidos debido a la gran cantidad de fibra.

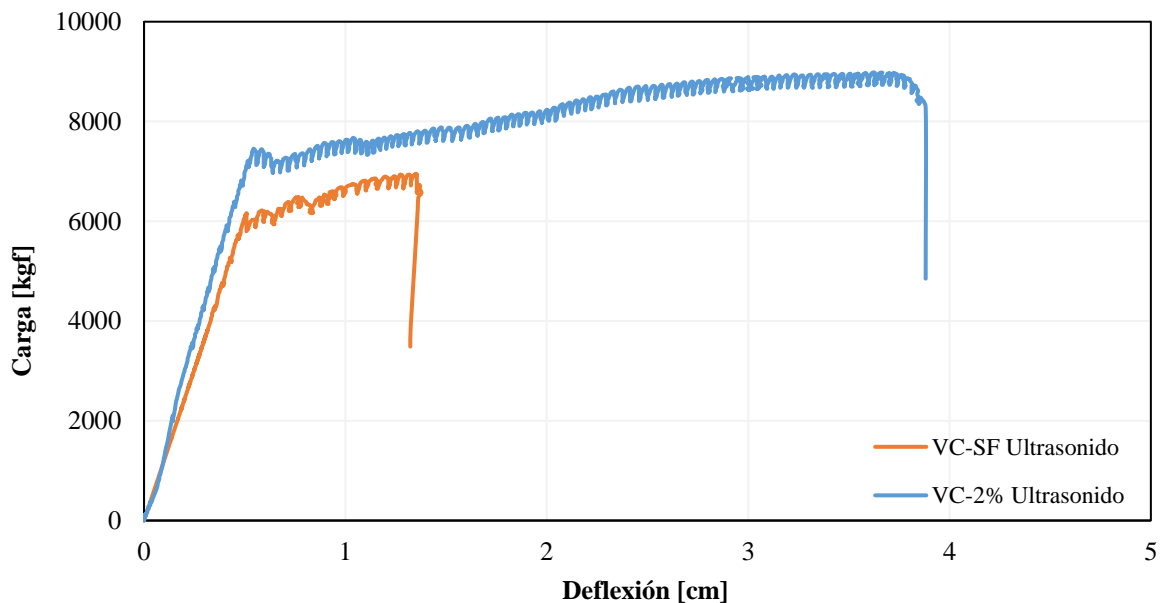


Figura 4.19: Curva ensayo a flexión vigas cortas. (ultrasonido).

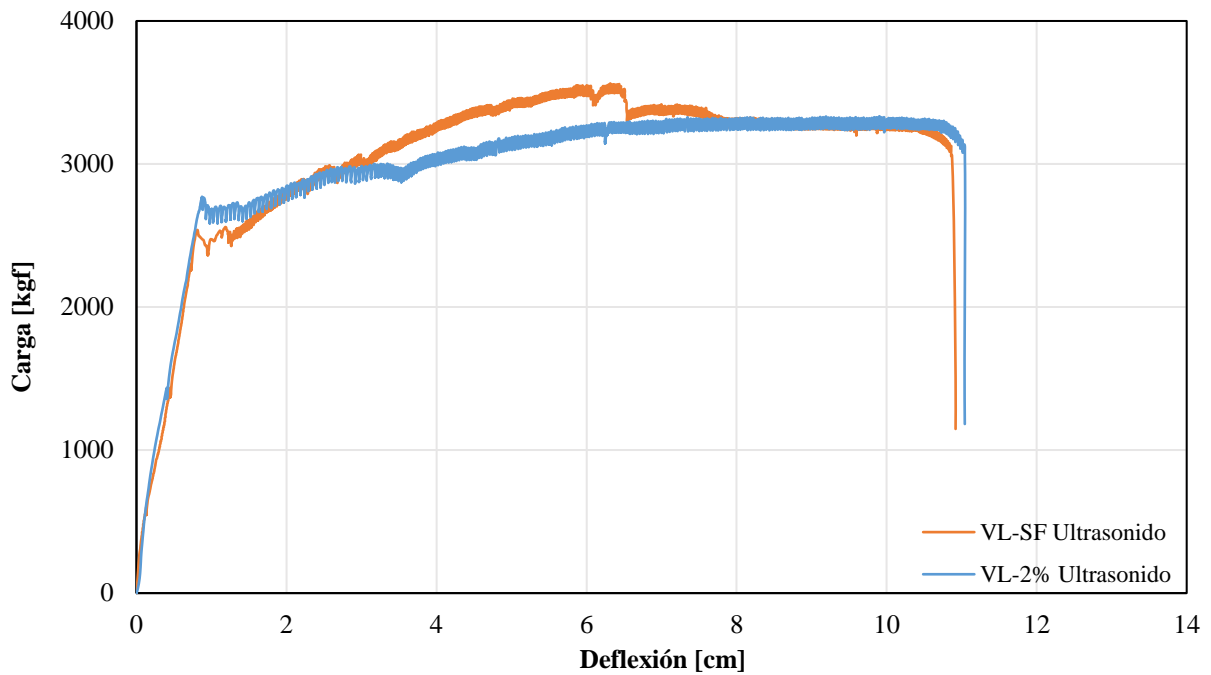


Figura 4.20: Curva ensayo a flexión vigas largas. (ultrasonido).

#### 4.5.2. Resultados análisis por fotogrametría

Para el análisis DIC (Correlación de Imágenes Digitales) se utiliza el programa Ncorr dentro del software Matlab, el cual permite evaluar las deformaciones y desplazamientos producidos durante el ensayo de las vigas. El detalle del funcionamiento de este programa se encuentra en el Anexo 5.

Para efectuar este análisis, se deben configurar ciertos parámetros dentro del programa Ncorr, que están relacionados directamente con el algoritmo contenido dentro de Ncorr, que utiliza para obtener los resultados [24]. Estos parámetros se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Parámetros a configurar para el análisis DIC.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor/Estado</b>
Subset Radius	100
Subset Spacing	20
Diff Norm C/O	1.00E-06
Iteration # C/O	50
Total Threads	4
Step Analysis	Checked
Auto Propagation	Checked
Subset Truncation	Checked
Strain Radius	5
Subset Truncation Strain	Checked

Se debe conocer el error asociado a la conversión de centímetros a píxeles, para garantizar la confiabilidad de los resultados finales. Este error está relacionado con la calidad de la cámara y la distancia focal de esta respecto al cuerpo a analizar. La cámara utilizada es una Canon® EOS Rebel T5 con un sensor de imagen de 18 megapíxeles y fue ubicada a 2 m del ensayo aproximadamente. Para obtener este error, se deben tomar dos fotos consecutivas de las vigas en un estado inalterado, por lo que el programa no debería arrojar valores de desplazamiento ni de deformación. Por lo tanto, los valores obtenidos en estos chequeos corresponden al error asociado a este método.

En la Figura 4.21 se presentan los campos de deformación vertical (V) entregados por Ncorr por cada viga a ensayar, que representan el error asociado al desplazamiento a través de la viga. En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de los errores para el desplazamiento horizontal y vertical; y en la Tabla 4.10 se presentan los resultados de los errores asociados a la deformación producida en la viga, en las direcciones “xx”, “yy” y “xy”.

Tabla 4.9: Resultados error asociado al desplazamiento.

<b>Viga</b>	<b>Desplazamiento horizontal U [cm]</b>	<b>Desplazamiento vertical V [cm]</b>	<b>Relación cm/píxel</b>
VC-SF	0.0019	0.0038	0.024702
VC-2%	0.0016	0.0045	0.024926
VL-SF	0.0006	0.0013	0.037932
VL-2%	0.0056	0.0053	0.038311



Tabla 4.10: Resultados error asociado a la deformación.

Viga	Deformación $\epsilon_{xx}$ [-]	Deformación $\epsilon_{yy}$ [-]	Deformación $\epsilon_{xy}$ [-]
VC-SF	0.0002	0.0002	0.0001
VC-2%	0.0001	0.0002	0.0001
VL-SF	0.0004	0.0004	0.0003
VL-2%	0.0005	0.0007	0.0003

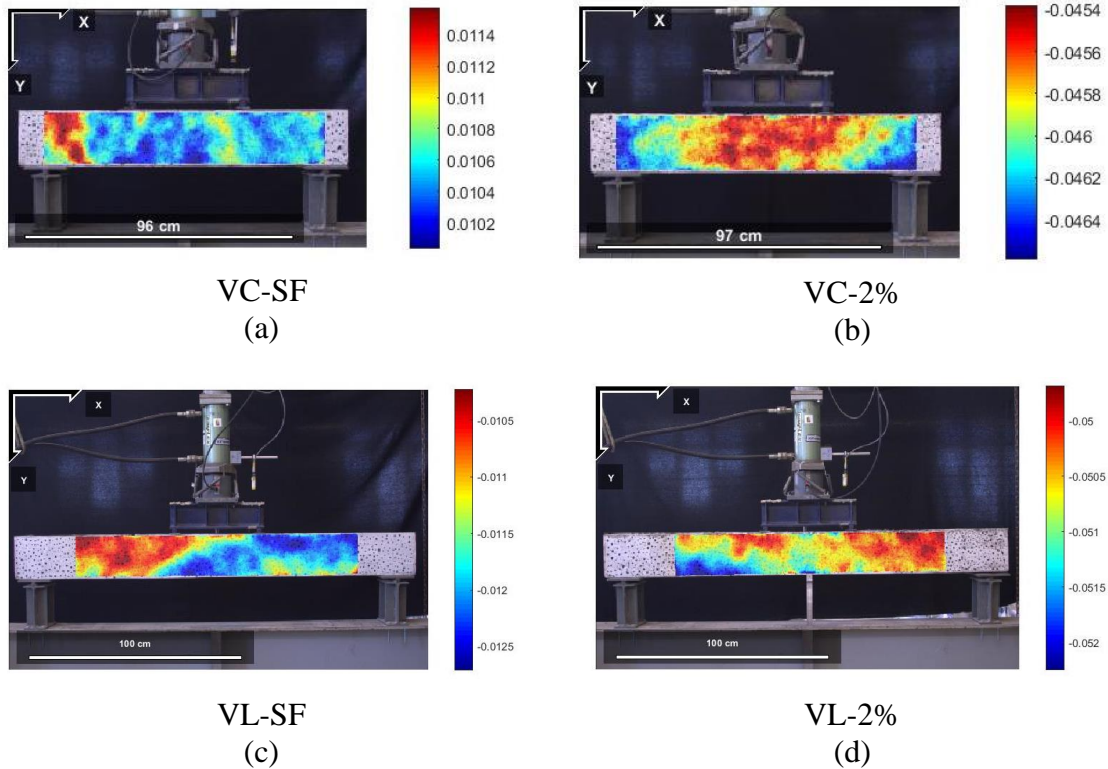


Figura 4.21: Campo de deformaciones entregados por Ncorr (dirección vertical).

El error máximo encontrado fue de 0.0056 cm en la dirección horizontal, que viene a ser un valor bajo en comparación con las magnitudes de desplazamiento obtenidas durante el ensayo, por lo que los datos obtenidos del programa Ncorr son confiables.

Se procede a realizar el análisis de las imágenes capturadas durante los ensayos, las que fueron tomadas cada 5 segundos, con la ayuda del software DSLR Remote Pro Multi-Camera. Este software tiene la capacidad de manipular las cámaras desde el computador, las que deben estar en modo manual y con el autoenfoco desactivado. En la Tabla 4.11 se presenta la configuración utilizada en este software.

Tabla 4.11: Configuración software DSLR Remote Pro Multi-Camera

Parámetro	Valor/Estado
Tv	1/8
Av	6.3
Exp	M
ISO	100
Exposure compensation	N/A
Flash compensation	N/A
Size/Quality	Raw
White balance	Auto (White)
Metering Mode	Evaluative
Drive Mode	Single shot
AF Mode	Manual Focus
Picture style	Auto

Luego del análisis DIC realizado por el programa Ncorr, se proceden a extraer los resultados del desplazamiento y deformación de las vigas. Para la construcción de la curva carga-deflexión, que se observan en la Figuras 4.22 y 4.23, Ncorr permite obtener los resultados del desplazamiento de cada píxel dentro de la región de interés del ensayo en cada una de las fotos analizadas, por lo que se selecciona el píxel central en la parte superior de la viga. Este desplazamiento en cada foto se asocia a la carga obtenida, sabiendo que las imágenes se obtienen cada 5 segundos, por lo que el vector de carga se desglosa en este intervalo de tiempo.

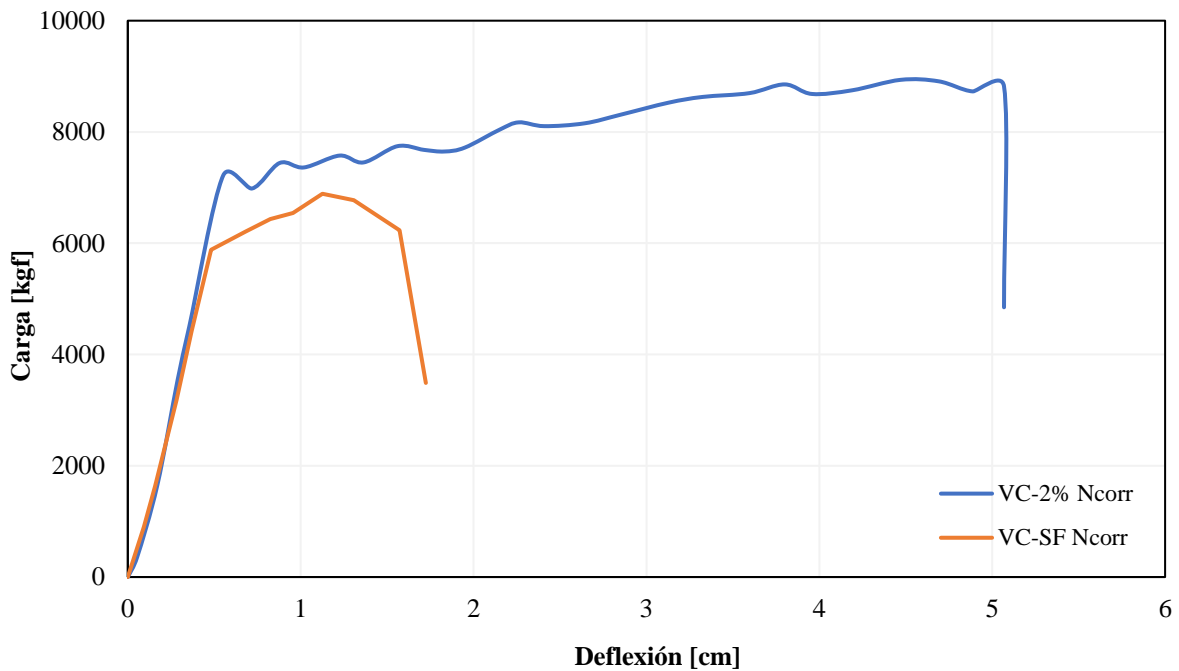


Figura 4.22: Curva carga-deflexión Viga corta (Ncorr).

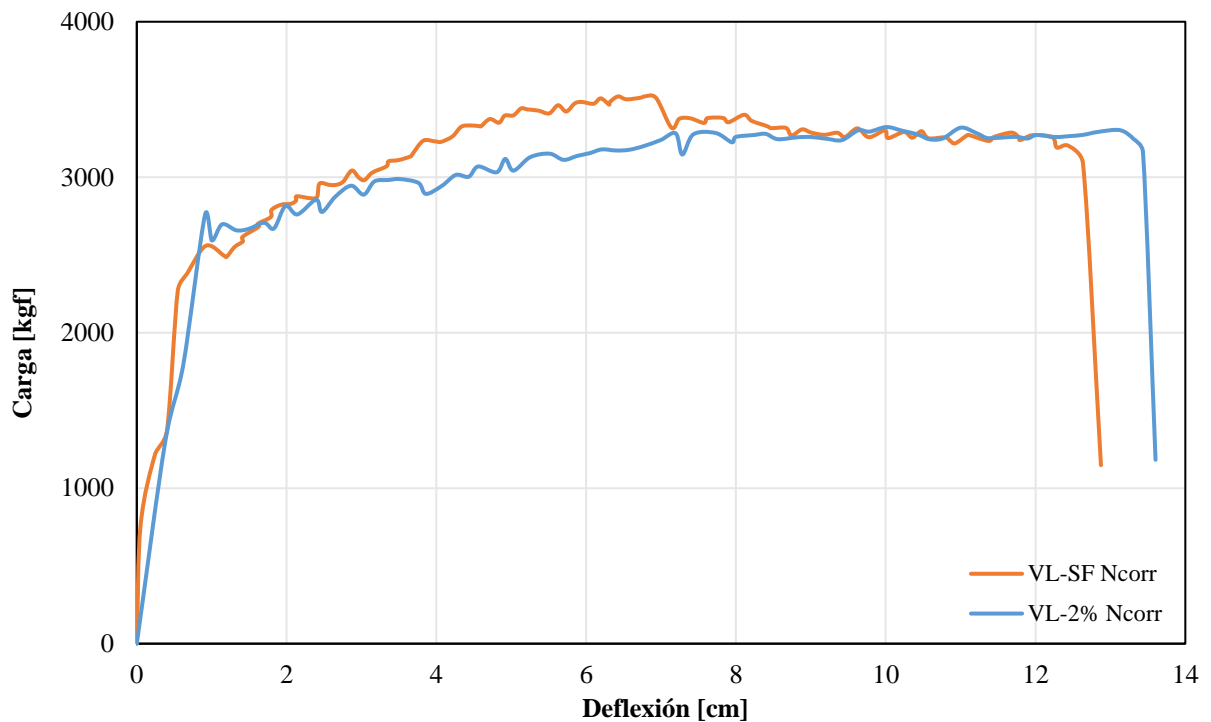


Figura 4.23: Curva carga-deflexión Viga larga (Ncorr).

Se observa que para las vigas cortas (Figura 4.22), se obtienen respuestas similares a las del sensor ultrasónico, llegando a una carga máxima de 6889 kgf y un deflexión máxima de 1.7 cm en la viga sin fibra; y para la viga con un 2% de fibras, se obtiene una carga máxima de 8936.5 kgf y una deflexión de 5.1 cm.

En el caso de las vigas largas (Figura 4.23), se obtiene una carga máxima de 3519.5 kgf para la viga sin fibra y de 3322.6 kgf en la viga con 2% de fibra. Además, la deflexión máxima fue de 12.87 cm para la viga sin fibra y de 13.6 cm en la viga con 2% de fibra, observando un comportamiento similar a los resultados del sensor ultrasónico.

Además, se analizan los campos de deformaciones obtenidos durante el ensayo, en la dirección “xx” cada cierto intervalo de deflexión. En las tablas 4.12 y 4.13 se presentan los resultados de este análisis según el tipo de viga, entregando la deformación máxima dentro de las vigas en cada intervalo. Además, se observan en las Figuras 4.24 a 4.27, los campos de deformaciones horizontales para cada intervalo de deflexión.

Tabla 4.12: Deformaciones horizontales Viga Corta

Viga	Deflexión [cm]	$\epsilon_{xx}$ [-]
VC-SF	0.28	0.0061
	0.82	0.0346
	1.7	0.3656
VC-2%	1.1	0.1272
	3.1	0.3056
	5.1	0.661

Tabla 4.13: Deformaciones horizontales Viga Larga.

Viga	Deflexión [cm]	$\epsilon_{xx}$ [-]
VL-SF	0.92	0.0103
	4.6	0.0585
	8.5	0.1283
	12.9	0.4149
VL-2%	0.91	0.0087
	5	0.1311
	9	0.486
	13.6	1.0684

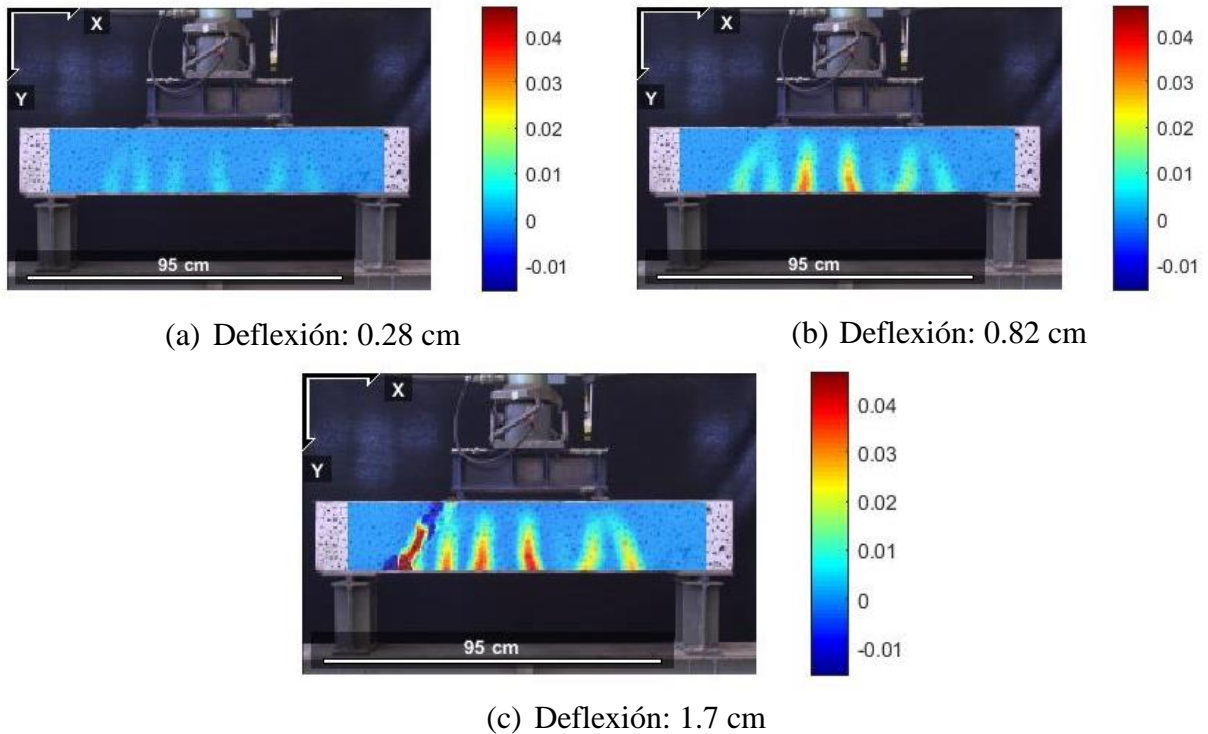


Figura 4.24: Deformación  $\epsilon_{xx}$  en VC-SF.

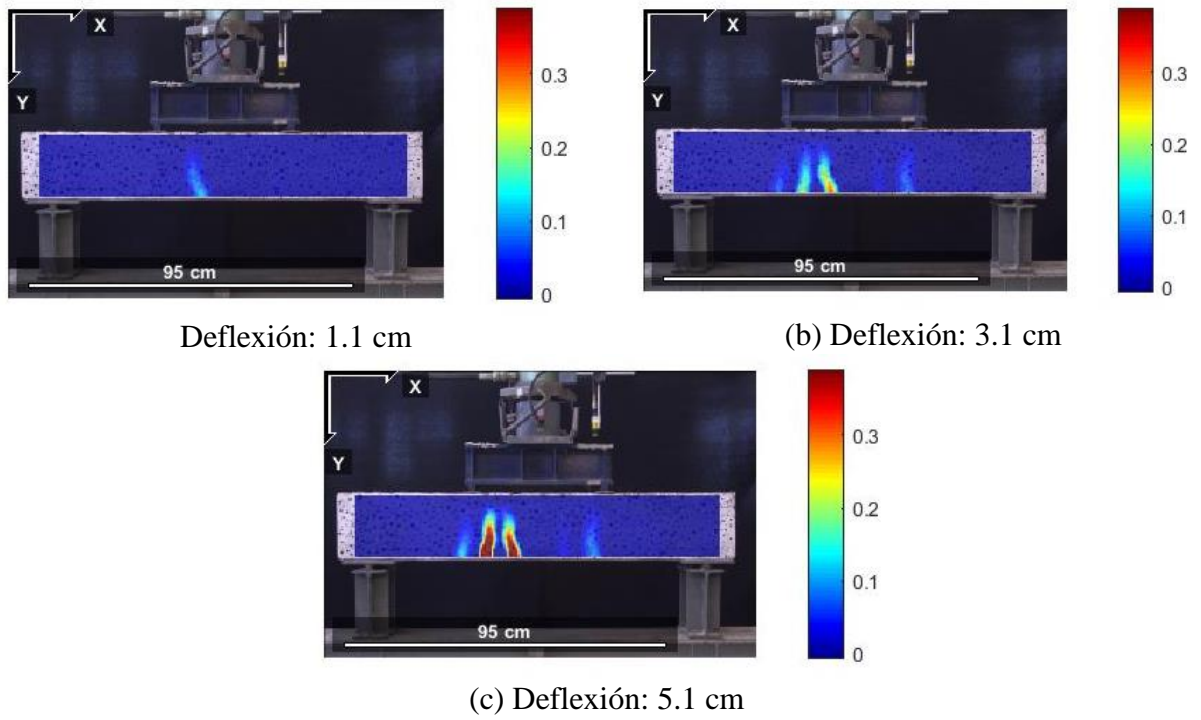


Figura 4.25: Deformación  $\epsilon_{xx}$  en VC-2%.

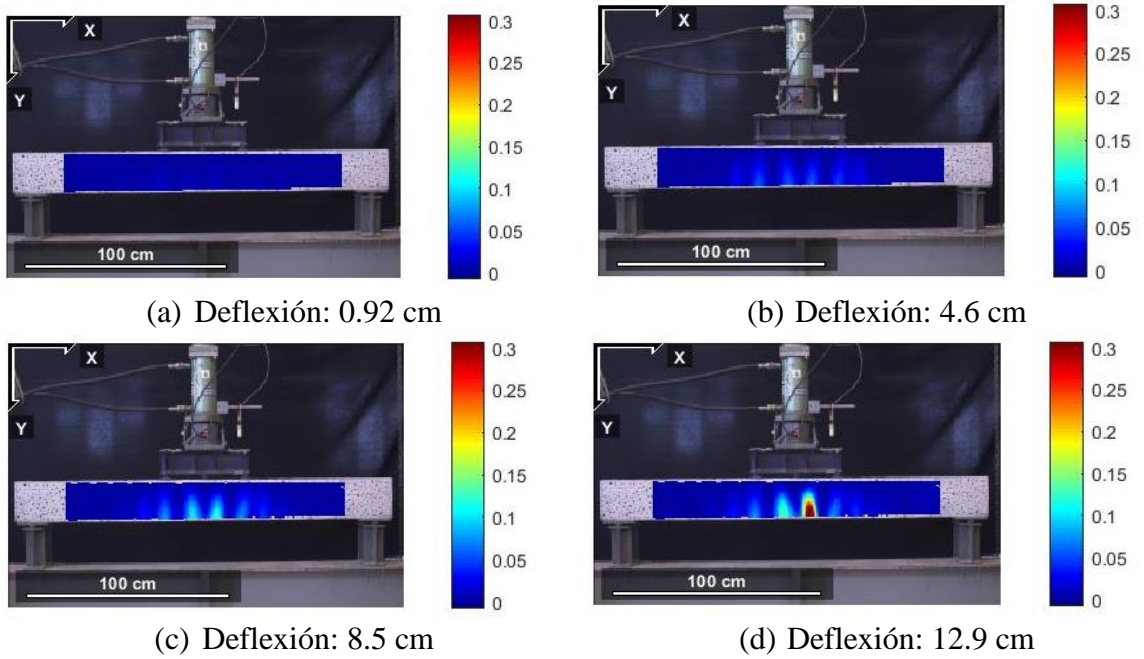


Figura 4.26: Deformación  $\epsilon_{xx}$  en VL-SF.

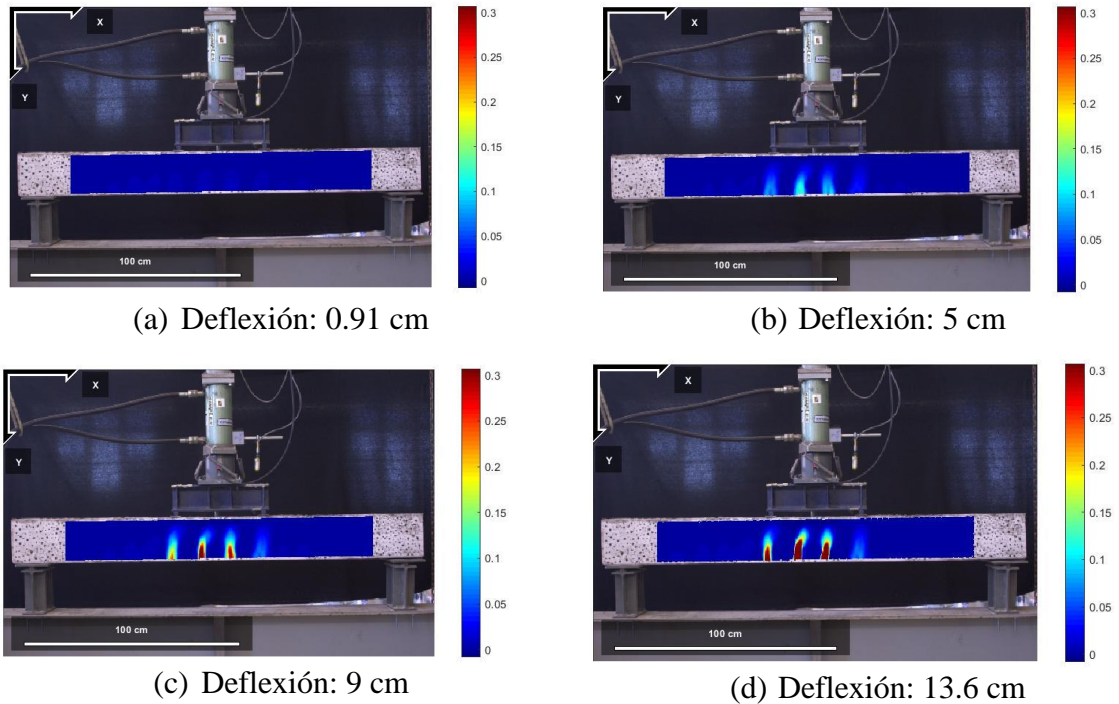


Figura 4.27: Deformación  $\epsilon_{xx}$  en VL-2%.

Se puede apreciar en la Figura 4.24 que la viga corta sin fibra presenta una falla al corte, que se observa con mayor claridad en la imagen (c), presentando un agrietamiento inicial con fisuras cercanas a los apoyos. Sin embargo, en la viga corta con fibras (Figura 4.25) se aprecia que las fisuras iniciales son más céntricas, lo que finalmente genera una falla a flexión en la viga.

En el caso de las vigas largas (Figuras 4.26 y 4.27), la distribución de grietas fue similar en ambas vigas, obteniendo mayores deformaciones longitudinales en la viga con 2% de fibra. Además, se puede apreciar que en la viga sin fibra se forma una grieta principal de mayor tamaño, mientras que en la viga con fibra se logra ver al menos tres grietas de casi las mismas dimensiones.

Las imágenes del estado final de las vigas cortas se observan en la Figura 4.28, en donde se aprecia claramente la diferencia en el tipo de falla, fenómeno que también se puede observar en los ensayos realizados por Reveco [22], quien confeccionó “vigas cortas” de las mismas dimensiones, con una cuantía de fibra de 1.23%. Las imágenes de sus ensayos se observan en la Figura 4.29.

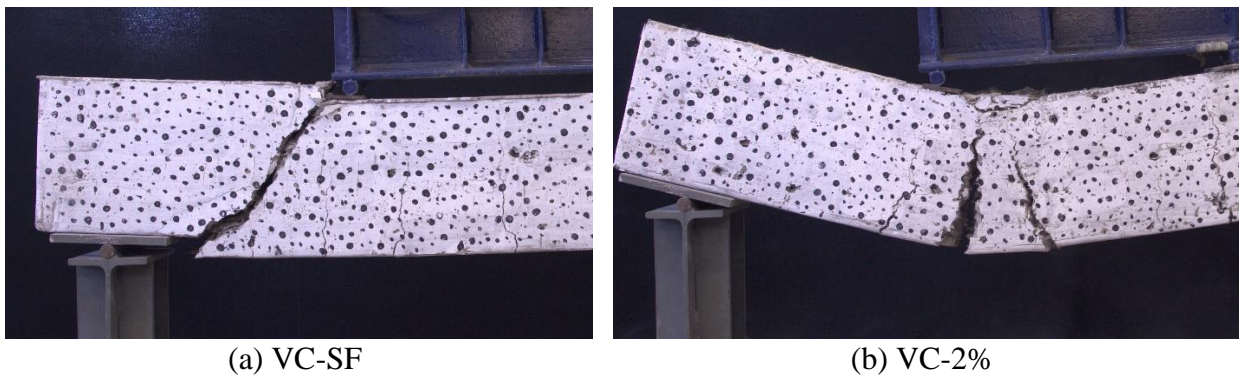


Figura 4.28: Estado final de Vigas Cortas.

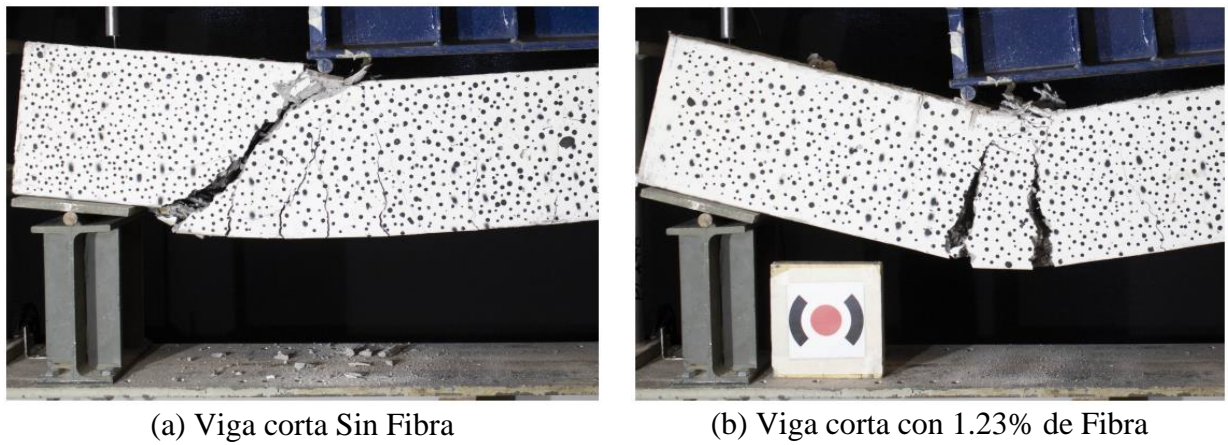


Figura 4.29: Vigas cortas ensayadas por Revco [22].

Además, en las Figuras 4.30 y 4.31 se observan las grietas que se formaron en VL-SF y VL-2% respectivamente, imágenes tomadas en el instante de deflexión máxima de cada ensayo. Acá se puede ver con más detalle la cantidad y dimensiones de las grietas.



Figura 4.30: Estado final viga VL-SF.



Figura 4.31: Estado final viga VL-2%.

En la Figura 4.32 y 4.33 se comparan las curvas obtenidas por el sensor ultrasónico y Ncorr, en donde se observa un comportamiento similar en ambos métodos durante todo el ensayo. En los resultados de Ncorr se aprecia una diferencia mayor en la deflexión máxima entre las vigas, siendo mayor para las vigas con fibras. En general, Ncorr entrega una mayor deflexión en las vigas dado que este parámetro se está midiendo justo en el centro superior de la viga, en cambio el sensor ultrasónico mide el desplazamiento sobre la vigueta de carga. En cuanto a la carga observada pueden existir diferencias debido al intervalo de tiempo que hay entre cada imagen, por lo que algunos datos de carga no son considerados.

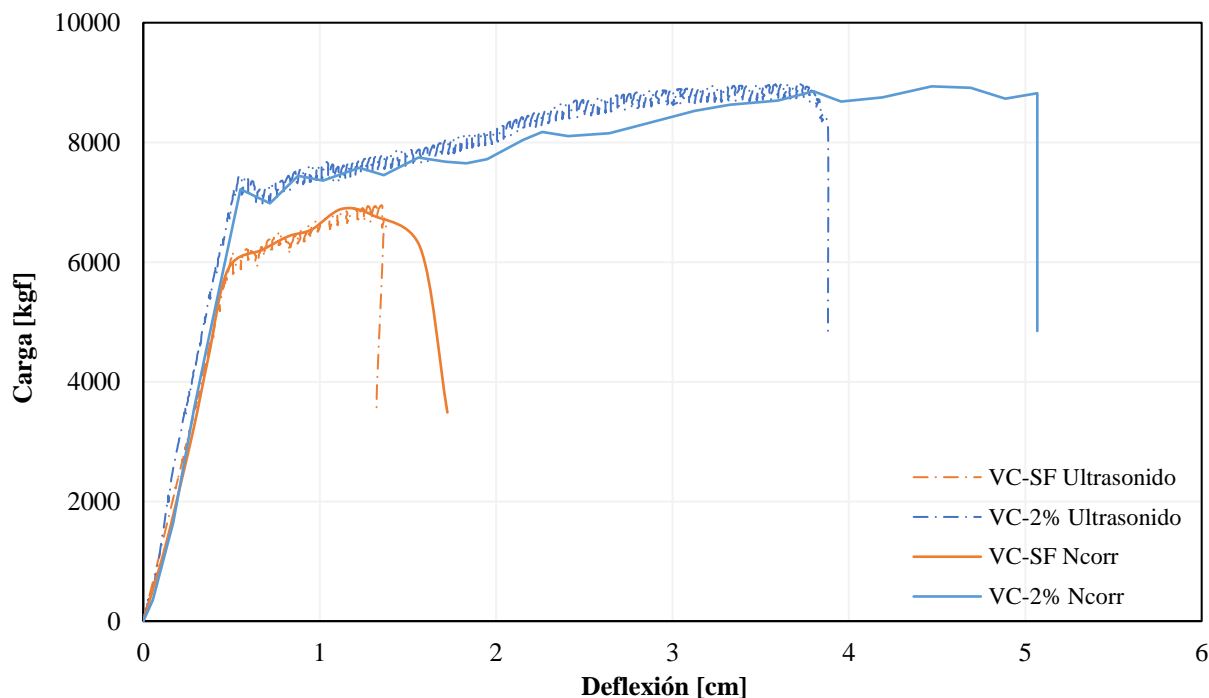


Figura 4.32: Comparación de resultados Vigas Cortas (Ultrasonido y Ncorr).



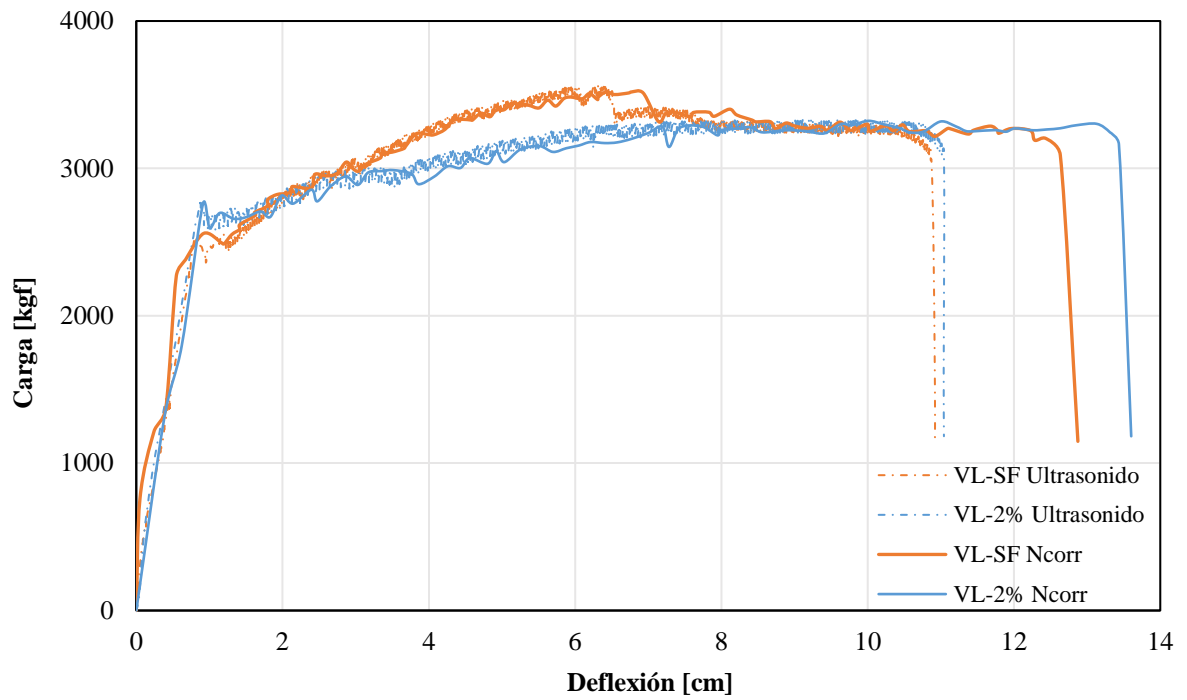


Figura 4.33: Comparación de resultados Vigas Largas (Ultrasonido y Ncorr).

# QUINTO CAPÍTULO

## 5. Conclusiones

En esta investigación se llevó a cabo un estudio experimental sobre el comportamiento del hormigón, tanto con agregado grueso y fino, reforzado con fibras de PVA, que ocupaban un volumen de hasta un 2% de las muestras. El objetivo principal de este estudio era el de caracterizar la respuesta a tracción del hormigón reforzado con fibras de PVA y analizar el aporte producido por la fibra en relación con la ductilidad y resistencia del material.

De acuerdo con lo visto en la literatura, se esperaba que la adición de fibras mejorara la ductilidad de las probetas ensayadas a tracción directa. A pesar de no obtener grandes deformaciones, la ductilidad se vio ampliamente mejorada a medida que se aumentaba la cantidad de fibra. Esta mejora se presentó con mayor intensidad en las probetas de árido fino (M3), seguido de M2 y M1 (Figuras 4.3-4.5). A pesar de no obtener un comportamiento del tipo “strain hardening” (Figura 2.4), en las curvas de M3 (Figura 4.5) con presencia de fibras, se aprecia un aumento de tensión luego del decaimiento debido a la fisuración, aunque no llega a sobrepasar la tensión máxima obtenida en la etapa de pre-fisuración. En el caso de M2 ocurre el mismo fenómeno, pero solo para las probetas con 2% de fibra. En cuanto a M1, la tensión luego de la fisuración siempre fue disminuyendo. Este tipo de respuesta se debe al tamaño máximo de árido dentro de la matriz de hormigón, ya que la presencia de partículas más grandes impide una dispersión uniforme de las fibras, generando “nidos” y más espacios vacíos dentro de la matriz de hormigón. Esto se puede observar en la Figura 4.6, donde se compara la distribución de la fibra dentro de las mezclas realizadas y se aprecia como en la probeta de M3 (Figura 4.6(c)) las fibras se distribuyen de manera uniforme, lo que se va perdiendo para las probetas de M2 y M1. Esta mejor dispersión va directamente relacionada con la capacidad de absorción de energía en la etapa de post-fisuración, que se ve reflejado en los resultados de la Tabla 4.1, en donde las probetas de M3 lograron adquirir una mayor tenacidad post fractura.

En cuanto a la tensión máxima obtenida en los ensayos de tracción directa, la fibra logra un aumento en los esfuerzos máximos para las muestras de M2 y M3 (Tabla 4.1), con una mayor eficacia en esta última mezcla, aunque cabe mencionar que las probetas sin fibra para M3 logran soportar esfuerzos bajos en comparación con las otras mezclas. Sin embargo, la presencia de 2% de fibra logra un incremento en la tensión máxima de más del doble, logrando igualar las tensiones máximas de M1, que es la mezcla con mayor tenacidad a la fractura debido al tamaño de los áridos que contiene. En el caso de M1, las mayores tensiones obtenidas fueron en las probetas con 1.23% de fibra, que superaron en un 13% a las probetas sin y con 2% de fibras. Esto indica que la cuantía óptima de fibras se vio sobrepasada en esta mezcla específica y la dosificación que logre la mejor respuesta en la probeta puede ser cercano al 1.23%, ya que, tal como se revisó en la literatura, se ha demostrado que la cantidad optima de fibra en mezclas de áridos gruesos no sobrepasa el 2%.

En los ensayos a compresión, según la literatura consultada, no se debiera observar una gran variación en los esfuerzos máximos entre las probetas con y sin fibras. Lo que, si debiera suceder con la adición de fibras, es una mejora en la ductilidad en la etapa de pre-fisuración y una caída más paulatina de la tensión en la etapa posterior al agrietamiento. Según los resultados obtenidos, la adición de fibras logra un leve aumento de la tensión máxima en las probetas de M2 y M3, de

un 13% y 15% respectivamente, con respecto a las muestras sin fibra. En el caso de M1, el esfuerzo máximo osciló entre 30 y 40 MPa, con un promedio de 34 MPa, sin poder distinguir alguna diferencia debido a la adición de fibras. Si se pudo observar una disminución en la tasa de decaimiento de la tensión en la etapa post-fisuración en todas las mezclas, debido al trabajo de la fibra, ya que estas ejercen un efecto de puente lateral en las grietas que se forman luego de llegar al esfuerzo máximo. Comparando los resultados de M1 (Figura 4.7) con los de Reveco (2020) (Figura 2.7), que corresponden a mezclas con misma dosificación de áridos que M1, se observa casi la misma tensión máxima promedio (33.4 MPa para los resultados de Reveco) y la deformación máxima del espécimen con un 1.23% de fibra (M03) fue de 0.022, muy cercana a la obtenida en las probetas de M1 con la misma cantidad de fibra, que fue en promedio de 0.03. Con respecto al modo de falla, esta fue de fisuras verticales (Figura 4.10), que es aceptada como rotura correcta según la NCh 137-2009. Debido a esto, se puede afirmar que los datos son consistentes y la metodología de ensayo es confiable.

En cuanto a los ensayos a flexión de viguetas, la adición de fibras produce un aumento en la carga máxima soportada por la probeta, con una notoria mejora en las mezclas M2 y M3, ya que en el caso de M1, el aumento de carga fue leve. También se observa una respuesta dúctil debido a la presencia de fibras, llegando prácticamente a la misma deflexión máxima promedio en los tres tipos de mezcla. Si se hubiera tenido viguetas con 1.23% de fibra en cada mezcla, el análisis podría haber sido más completo, pero lamentablemente no se pudo confeccionar esta muestra por falta de material. Aun así, se lograron observar dos de los fenómenos más importantes en lo que concierne a fibras como refuerzo, ya que se pudo apreciar durante los ensayos el efecto de puente que realizan las fibras a través de las grietas (Figura 4.15) y también se presentó un agrietamiento múltiple en las viguetas de M3 (Figura 4.16), lo que confirma un mejor comportamiento de la fibra en presencia exclusiva de árido fino. Con respecto a la respuesta posterior al agrietamiento (Figuras 4.12-4.14), se observa una oscilación en la carga en la parte final de la curva, que representa la rotura paulatina de las fibras. En el caso de VM3-2%-1, se aprecian oscilaciones más pequeñas en comparación a otras muestras, esto debido a una mejor dispersión de fibras a través de la matriz de hormigón con árido fino.

Al comparar las tensiones máximas obtenidas en los diferentes ensayos, los esfuerzos máximos a tracción directa deberían ser alrededor de un 10% del esfuerzo máximo a compresión y el esfuerzo máximo por flexión supera en aproximadamente un 35% al de tracción directa, según lo revisado en la bibliografía. De acuerdo con los resultados obtenidos, las tensiones máximas a tracción directa se acercan a la relación del 10% con respecto al ensayo de compresión, siendo un 6.6% en promedio en el caso de M1, 7.8% en el caso de M2 y 7.6% para M3. En el caso de la relación entre esfuerzo a flexión y tracción directa, esta no se cumple ya que los esfuerzos a flexión fueron superiores en más de un 50% en comparación con los de tracción directa. En cuanto a la relación entre las tensiones de compresión y tracción a flexión, los resultados experimentales fueron cercanos a los teóricos, según la Tabla 4.5, a pesar de que el análisis contempla fibras de acero, ya que no existen estudios de este tipo sobre fibras de PVA. Las bajas tensiones a tracción directa se pueden justificar debido al tipo de probeta, ya que las muestras cilíndricas entregan menores tensiones en comparación a las del tipo “hueso de perro”. Aun así, se logran datos consistentes, ya que los resultados a flexión fueron mayores que los de tracción directa.

En cuanto a la rigidez obtenida por cada probeta en los ensayos, estas fueron consistentes, ya que los valores rondan alrededor de los 20 GPa, siendo mayores en las probetas de M1, seguido de

M2 y finalmente M3. Esto se debe a la dosificación de las mezclas, ya que la presencia de árido grueso da una mayor tenacidad a la matriz de hormigón. La adición de fibra no influye en los valores de módulo de elasticidad.

Con respecto a los ensayos a flexión de vigas con armadura, el resultado más importante que se logró observar fue el del cambio en el tipo de falla en la viga corta con fibra de PVA, lo que provoca una mayor ductilidad en la viga debido a la formación de grietas a flexión, en comparación con la viga corta sin fibra, que demora menos tiempo en fallar. El cambio de falla por corte a falla por flexión aparece anteriormente en el estudio realizado por Reveco, en una viga corta con un porcentaje de 1.23% de fibra, además, en su estudio analiza un modelo de la viga corta en OpenSees que también logra captar este cambio en el tipo de falla, por lo que esto valida la hipótesis de que la fibra ayuda a mejorar el comportamiento en elementos propensos a fallar por corte, lo que sería un gran aporte en la construcción de elementos propensos a este tipo de falla como vigas o losas.

En cuanto a las vigas largas, no se observó diferencias en el comportamiento, a pesar de la adición de fibras. Las cargas y deflexiones máximas obtenidas son prácticamente las mismas en ambas vigas, solo se observó una diferencia de 1 cm de deflexión a favor de la viga con fibras. Estos resultados eran esperados debido al comportamiento observado por M1 en los ensayos anteriores. En cuanto al análisis de deformaciones, se observa una misma cantidad de grietas en ambas vigas, sin embargo, se logra una mayor deformación longitudinal en la viga con fibra de PVA, además, la fibra ayuda a la formación de más de una grieta con las mismas dimensiones, en cambio, en la viga sin fibra, solo se forma una grieta principal, seguida de otras más pequeñas. La aparición de más grietas de mismas dimensiones ayuda a obtener una mayor deflexión máxima.

En resumen, como conclusión, se establece que la fibra de PVA logra un mejor comportamiento dúctil en el hormigón, ya sea de áridos grueso o fino, aunque las mayores mejoras se produjeron en M3 (tamaño máximo de agregado: 0.6 mm), por lo que se comprueba que las fibras trabajan de mejor manera en una matriz de agregado fino. En cuanto a tensiones máximas, la adición de fibras logra aumentar la resistencia en del hormigón en muestras de áridos pequeños (tamaño inferior a 9.5 mm), mientras que en muestras con agregado grueso no existe una gran variación. En cuanto a vigas de hormigón armado, el resultado más importante fue el del cambio en el modo de falla en la viga corta con fibra. Se sugiere realizar los mismos tipos de ensayos con el mismo tipo de fibra, pero de un mayor largo, para comprobar si se obtiene una mejor respuesta dúctil a tracción, además se invita a investigar sobre el cambio que produce la fibra en el tipo de falla en elementos como vigas y losas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. 318, A. C. (2019). ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute.
- [2]. Allahverdi, A., Kianpur, K., & Moghbeli, R. (2010). Effect of polyvinyl alcohol on flexural strength and some important physical properties of portland cement paste. *Iranian Journal of Materials & Engineering*, 7(1), 1 – 6.
- [3]. Ayub, T., Khan, S. U., and Ayub, A. (2019). Analytical model for the compressive stress–strain behavior of PVA-FRC. *Construction and Building Materials*, 214:581–593.
- [4]. Blaber, J., Adair, B., and Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55(6):1105–1122.
- [5]. Committee ACI. (1996). State-of-the-art report on fiber reinforced concrete, ACI
- [6]. D.J. Kim, A.E. Naaman, S. El-Tawil, High performance fiber reinforced cement composites with innovative slip hardening twisted steel fibers, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3 (2) (2009) 119–126.
- [7]. E.H. Yang, V.C. Li, Strain-rate effects on the tensile behavior of strainhardening cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 96–104.
- [8]. Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., & Cummins, T. (2010). Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. *Construction and Building Materials*, 24, 2286 – 2293.
- [9]. Jeria, R. “Hormigón con Fibra”, Ministerio de obras públicas. Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Hormigon%20con%20Fibra%20RJ.pdf>
- [10]. JSCE. Recommendations for Design and Construction of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, (2008) pp. 1–16.
- [11]. K.E. Kesner, S.L. Billington, K.S. Douglas, Cyclic response of highly ductile fiberreinforced cement-based composite, *ACI Mater. J.* 100 (5) (2003) 381–390.
- [12]. Khan, S., & Ayub, T. (2016). Modelling of the pre and post-cracking response of the PVA fibre reinforced concrete subjected to direct tensión. *Construction and Building Materials*, 120, 540 – 557.

- [13]. Li, Z., Li, F., Chang, T., & Mai, Y. (1998). Uniaxial Tensile Behavior of Concrete Reinforced with Randomly Distributed Short Fibers. *ACI Materials Journal*, 95, 564 – 572.
- [14]. Lin, J., Song, Y., Xie, Z., Guo, Y., Yuan, B., Zeng, J., & Wei, X. (2020). Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. *Journal of Building Engineering*, 29, 1- 9.
- [15]. Manríquez, I. (2016). Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor. Tesis de Magister, Universidad de Chile.
- [16]. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties and materials*, 3rd Ed., McGraw-Hill.
- [17]. Muñoz, G. (2017). Estudio experimental-teórico de muros de hormigón armado con discontinuidad central en la base e influencia de la presencia de losas. Tesis de Magister, Universidad de Chile.
- [18]. Noushini, A., Samali, B., & Vessalas, K. (2013). Influence of Polyvinyl Alcohol Fibre Addition on Fresh and Hardened Properties of Concrete. *Hokkaido University*, 1 – 8.
- [19]. Paegle, I., & Fischer, G. (2012). Shear Crack Formation and Propagation in Fiber Reinforced Cementitious Composites (FRCC). *RILEM Bookseries*, 231 – 238.
- [20]. Pan, Z., Wu, Ch., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015). Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, 397 – 404.
- [21]. Redon, C., Li, VC, Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. & Ogawa, A. (2001). Measuring and modifying interface properties of pva fibers in ECC matrix. *Journal of materials en civil engineering*, 399 – 406.
- [22]. Reveco, J. (2020). Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA. Tesis de Magister, Universidad de Chile.
- [23]. Sahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K., Ranade, R. & Li, V. (2009). Influence of Aggregate Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*, 106(3), 308-316.
- [24]. Sahmaran, M., Yücel, H. E., Demirhan, S., Arýk, M. T., & Li, V. C. (2012). Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109(6), 627.

- [25]. Sakurada, R., Terui, K., Miyamoto, M., Ferrari, A., Sasaki, N., & Ishii, A. (2019). Strength Properties of Concrete Made with Granular Material. *ACI MATERIALS JOURNAL*, 116(14), 147 – 153.
- [26]. Sasmal, S. and Avinash, G. (2016). Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers. *Construction and Building Materials*, 128:136–147.
- [27]. Vandewalle, L. et al. (2003). Recommendations of RILEM TC162- TDF: ‘Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete:  $\sigma$ - $\epsilon$ -design method’ (final recommendation), *Mater. Struct.* 36, 560-567.
- [28]. Vasquez, N. (2019). Estudio de la variación de ductilidad y resistencia del hormigón al reforzarlo con microfibras de PVA. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [29]. Vera, D. (2020). La técnica de correlación de imágenes digitales aplicada a ensayos de materiales. Tesis de Bachiller en ciencias con mención en ingeniería mecánica, Universidad Católica del Perú.
- [30]. Vidaud, I., Fómata, Z., & Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras (parte I). *Construcción y tecnología en concreto*, 29 – 35
- [31]. Yu, K., Li, L., Yu, J., Wang, Y., Ye, J., and Xu, Q. F. (2018). Direct tensile properties of engineered cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials*, 165:346–362.
- [32]. Zheng, W., Kwan, A.K.H., Lee, P.K.K., 2001. Direct tension test of concrete. *ACI Mater. J.* 98 (1), 63–71.

## ANEXO

### A. Granulometría de áridos

A continuación, se presentan desde la Tabla A.1 a la Tabla A.4 los resultados obtenidos del análisis granulométrico, tanto para la gravilla, arena gruesa y arenas finas. Cabe recordar que, en el caso de la arena fina B, los datos de extraen de la investigación de Reveco [22].

Tabla A.1: Resultados granulometría arena fina A.

<b>Tamiz</b>	<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
<b>3/8"</b>	9.5	0	0	100
<b>#4</b>	4.75	1.53	0.51	99.49
<b>#8</b>	2.36	5.96	1.99	97.50
<b>#10</b>	2	1.5	0.50	97.00
<b>#30</b>	0.6	9.66	3.23	93.77
<b>#40</b>	0.425	6.16	2.06	91.71
<b>#50</b>	0.3	15.36	5.13	86.58
<b>#100</b>	0.15	111.03	37.09	49.49
<b>#200</b>	0.075	107.74	35.99	13.51
<b>Recipiente</b>		40.43	13.51	0
<b>Total</b>		299.37		
<b>Original</b>		300		



Tabla A.2: Resultados granulometría arena fina B.

<b>Tamiz</b>	<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
1/2"	12.5	0	0	100
3/8"	9.5	15	0.8	99.2
#4	4.75	7	0.37	98.8
#8	2.36	9	0.48	98.3
#10	2	3	0.16	98.2
#30	0.6	39	2	96.1
#40	0.425	87	4.6	91.4
#50	0.3	250	13.3	78.1
#100	0.15	905	48.3	29.7
Recipiente		555	29.6	0
<b>Total</b>		1870		
<b>Original</b>		1875		

Tabla A.3: Resultados granulometría arena gruesa.

<b>Tamiz</b>	<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
1/2"	12.5	0	0	100
3/8"	9.5	6.04	1.21	98.79
#4	4.75	98.41	19.72	79.07
#8	2.36	67.56	13.54	65.53
#10	2	16.16	3.24	62.30
#30	0.6	86.61	17.35	44.94
#40	0.425	35.1	7.03	37.91
#50	0.3	40.43	8.10	29.81
#100	0.15	97.9	19.62	10.19
#200	0.075	38.34	7.68	2.51
Recipiente		12.51	2.51	0.00
<b>Total</b>		499.06		
<b>Original</b>		500		

Tabla A.4: Resultados granulometría gravilla.

<b>Tamiz</b>	<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Peso retenido [g]</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
3/4"	19	11.88	1.19	98.81
1/2"	12.5	429.95	43.04	55.77
3/8"	9.5	270.61	27.09	28.68
#4	4.75	248.21	24.85	3.84
#8	2.36	18.1	1.81	2.03
#10	2	2.15	0.22	1.81
#30	0.6	6.99	0.70	1.11
#40	0.425	1.81	0.18	0.93
#50	0.3	1.76	0.18	0.75
#100	0.15	3.26	0.33	0.43
#200	0.075	2.33	0.23	0.20
Recipiente		1.95	0.20	0.00
<b>Total</b>		999		
<b>Original</b>		1000		

## B. Dispositivos a tracción y flexión

### B.1. Ensayo a tracción

El dispositivo a tracción consiste principalmente de 3 piezas que se ensamblan entre ellas y se conectan a la maquina universal de ensayo. La particularidad de estas piezas es que se diseñaron para contrarrestar los errores producidos en ensayos anteriores, en donde se producía un plano de falla a torsión en la probeta [22], debido a la configuración de las placas antiguas (Figura B.1).



Figura B.1: Placa utilizada anteriormente en ensayos de tracción.

El proceso de ensamblaje es el siguiente: primero las probetas son adheridas a la pieza C (Figura B.2(c)) en ambos extremos, con la ayuda de barras cilíndricas que se pasan a través de los agujeros de esta pieza, que cumplen la función de mantener el alineamiento del sistema y centrar la probeta en las placas. La pieza A (Figura B.2(a)) se introduce en el agujero central de la pieza B (Figura B.2(b)) y uno de este conjunto de piezas es colocado en la maquina universal, en la mordaza inferior. La pieza A es la que se conecta con las mordazas y esta queda con libre movimiento dentro de la pieza B, y así no generar torsión al momento del ensayo. Luego, cuando la probeta este totalmente adherida a las piezas C, están se atornillan, primero a la pieza B en la parte inferior de la máquina, y posteriormente el otro conjunto de piezas A y B se atornilla a la pieza C superior. Finalmente se conecta la mordaza superior a la pieza A del conjunto superior (Figura B.3).

A continuación, se presentan los planos de diseño para estos dispositivos con sus respectivas medidas. Se fabricaron 2 ejemplares para las piezas A y B, y 10 en el caso de la pieza C. La prensa metálica para sujetar la probeta no fue considerada, ya que se utilizan barras para el alineamiento durante el secado del adherente.

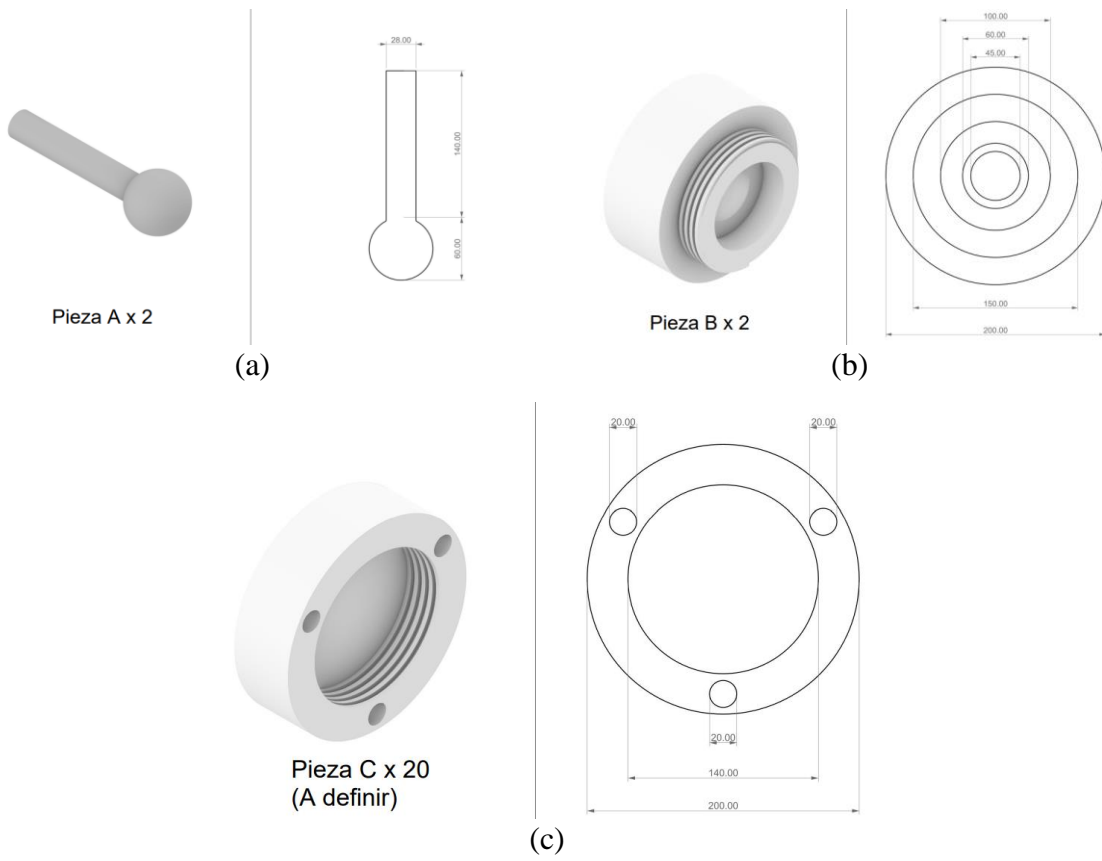


Figura B.2: Detalle de piezas del dispositivo a tracción.



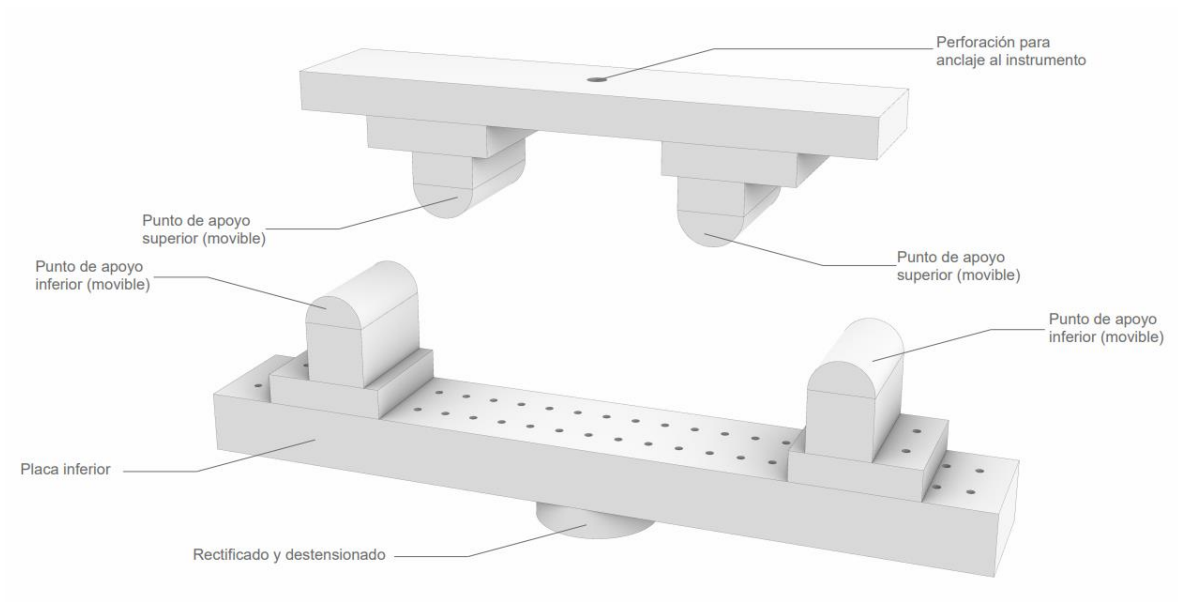


Figura B.4: Dispositivo a flexión ensamblado.

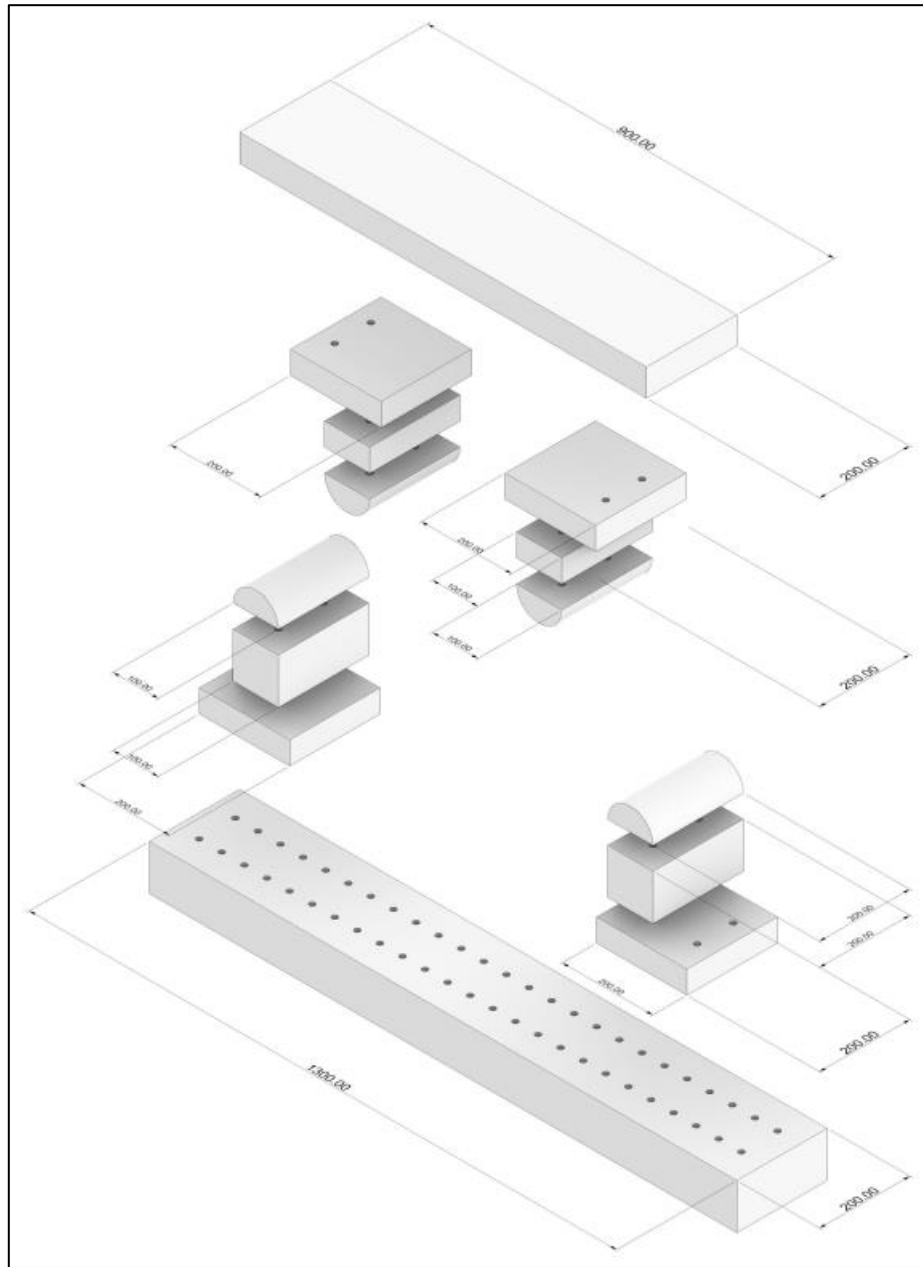


Figura B.5: Detalle de piezas dispositivo a flexión.

## C. Resultados pruebas preliminares

### C.1. Ensayo de tracción directa

En la Tabla C.1 se presentan los resultados de las probetas ensayadas como pruebas preliminares. Las tensiones máximas no tienen una gran variación entre las probetas y es razonable el valor en la muestra M3-SF1 ya que solo contiene árido fino. Además, el tipo de falla no altera el valor de la tensión máxima, lo que indica que las probetas se fisuran dentro del hormigón y no en el epóxico.

Tabla C.1: Resultados pruebas preliminares de ensayos a tracción directa.

Probeta	Tensión máxima [MPa]	Deformación post peak [mm/mm]	Tipo de Falla
M1-SF4	1.87	-	esperada
M1-SF5	2.12	-	esperada
M1-1.23%6	1.52	error	esperada
M1-2%6	2.09	error	extremo
M2-SF1	1.5	-	esperada
M2-1.23%1	1.88	0.00189	extremo
M2-1.23%6	2.24	0.00265	esperada
M2-2%1	2.28	0.004	extremo
M2-2%6	1.97	0.00324	extremo
M3-SF4	1.14	-	esperada

En la medición del desplazamiento, se produjo un error en la máquina universal al momento de ensayar las probetas M1-1.23%6 y M1-2%6, pero en las muestras de la mezcla 2 (M2) se puede observar que, para la cuantía de 2% de fibra de PVA, se tiene una mayor deformación posterior a la fisuración en comparación a una cuantía de 1.23%. El valor de la deformación post peak está medido desde el momento de la fisuración hasta el final del ensayo, ya que los valores de desplazamiento pre-fisuración no son confiables.

En la Figura C.1 se observa una comparación de la etapa de pre-fisuración en la probeta M2-1.23%-1 con los datos obtenidos mediante los sensores LVDT y la máquina universal. En este se puede apreciar la diferencia en la medición de la deformación de la probeta, donde los sensores LVDT tienen la capacidad de medir con mayor precisión deformaciones pequeñas. En el caso de la curva medida por la máquina universal, se obtiene una rigidez cercana a 1000 MPa, en cambio, con los datos obtenidos con los sensores LVDT se tiene un módulo de elasticidad de 15000 MPa, un valor más cercano a la rigidez típica del hormigón (~20000 MPa). Es por esto que se decide usar los sensores LVDT para obtener los datos de los ensayos hasta el peak de deformación.



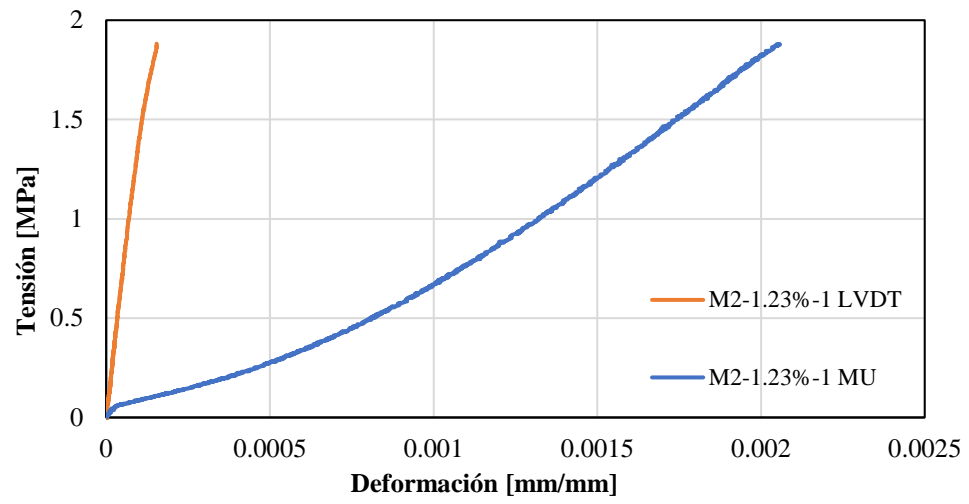


Figura C.1: Ensayo de probeta M2-1.23%-1.

## D. Metodología del programa Ncorr para fotogrametría

Para comenzar con el análisis de las fotografías se debe abrir el software Matlab y escribir en la ventana de comandos "handle\_ncorr = ncorr" para que aparezca la pestaña principal del programa Ncorr, la que se muestra en la Figura D.1.

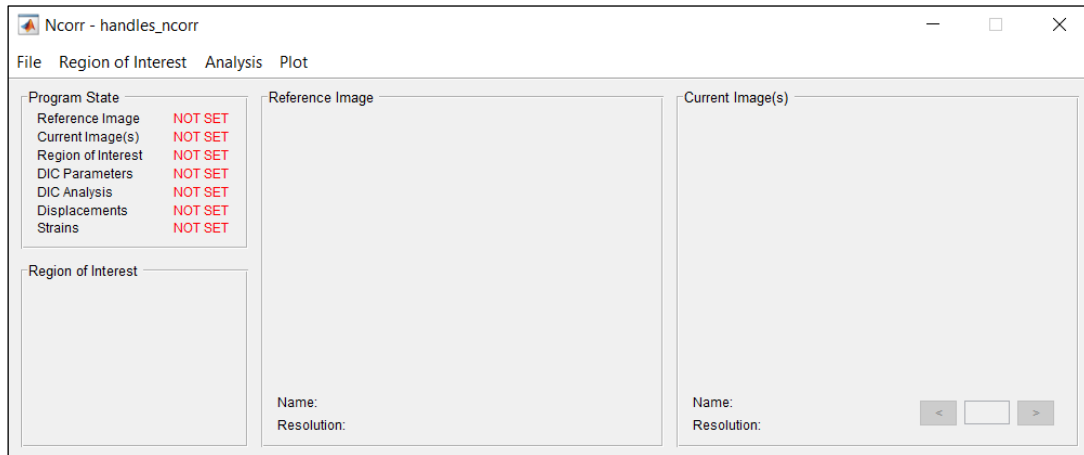


Figura D.1: Pestaña principal del programa Ncorr.

Antes de cargar las imágenes al programa, es importante tenerlas en el formato compatible (.jpg por ejemplo) y nombrarlas con el mismo título seguido del número de foto (Fotografía\_001). Primero se debe cargar la fotografía referencial al programa, la que corresponde a la probeta inalterada, accediendo a File > Load Reference Image. Luego se cargan las imágenes siguientes entrando a File > Load Current Image(s) > Load all (memory heavy) o Load Lazy (slower but less memory). Se recomienda usar la segunda opción (Load Lazy) ya que ocupa menos memoria en el equipo.

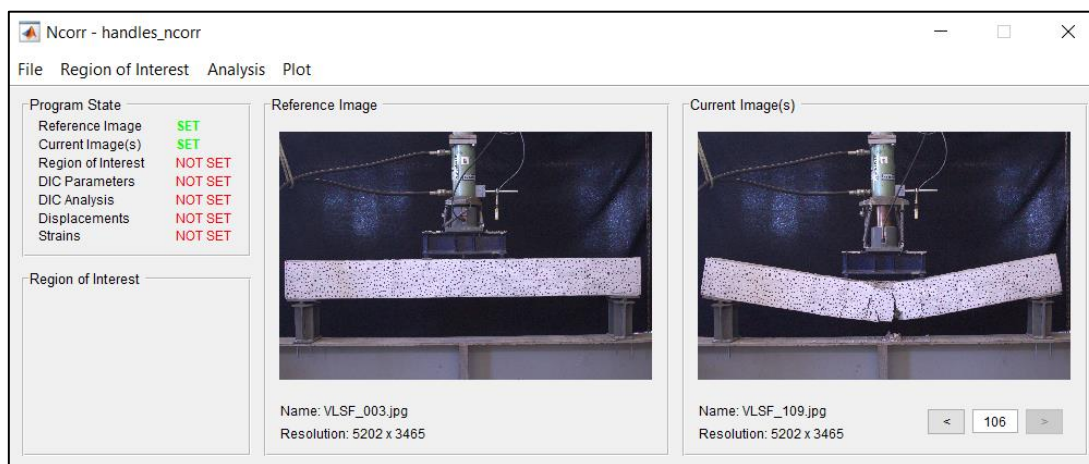


Figura D.2: Pestaña principal con imágenes cargadas.

A continuación, se debe establecer la región de interés (ROI) para determinar el área a examinar dentro de las fotografías. Para esto se debe acceder a Region of Interest > Set Reference ROI y aparecerá una nueva ventana (Figura D.3). Luego se debe hacer clic en “Draw ROI” y proceder a dibujar la región de interés en la fotografía.

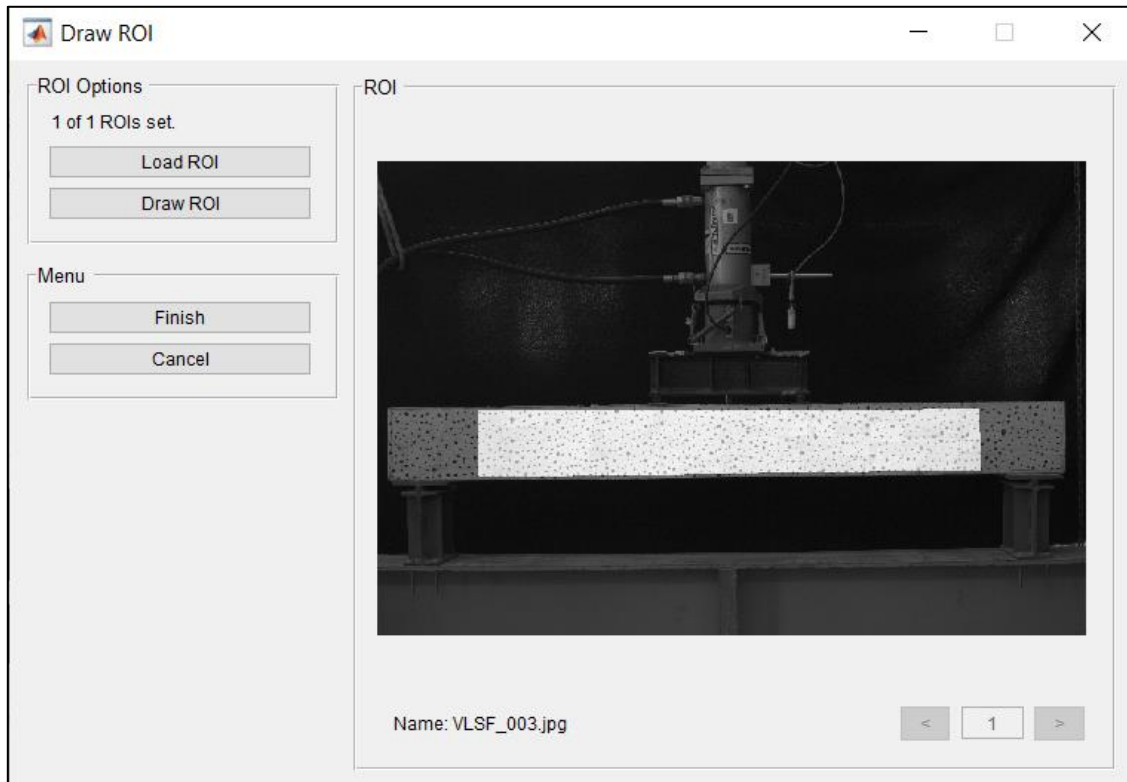


Figura D.3: Pestaña para establecer la ROI.

El siguiente paso es establecer los parámetros de análisis DIC, accediendo a Analysis > Set DIC Parameters, donde aparecerá una nueva pestaña (Figura D.4) con una serie de parámetros a configurar. Primero se establece el radio de pixeles (Subset Radius) y el espaciado que tendrán dentro de este subconjunto (Subset Spacing). Mientras más pequeño el subconjunto existirán menos datos de desplazamientos ruidosos. Luego se definen los parámetros que definen las iteraciones a realizar (Diff Norm e Iteration #). Se consideran las opciones de un análisis de altas deformaciones (High Strain Analysis), que actualiza la fotografía de referencia y la ROI en cada iteración y se considera también un análisis discontinuo cuando el material a examinar se separa, como lo es en este caso.

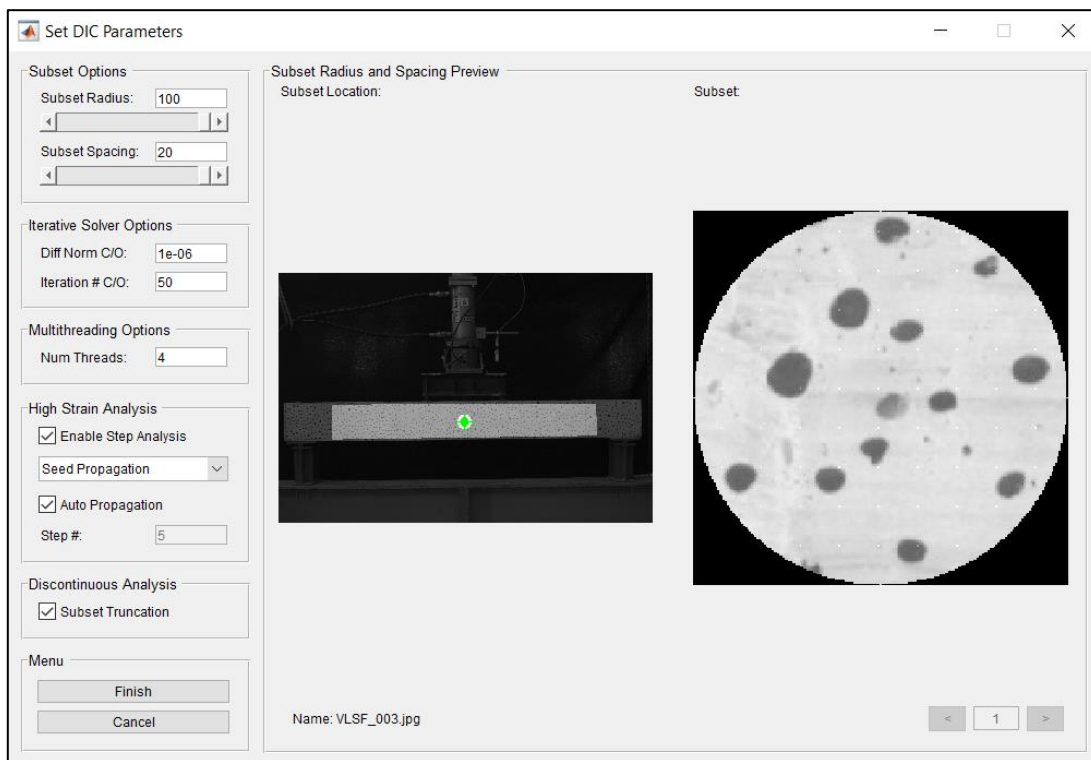


Figura D.4: Parámetros a configurar para el análisis DIC.

Para continuar, se debe acceder a Analysis > Perform Analysis, donde aparecerá una pestaña y se debe hacer clic en Select Region y seleccionar la ROI en la fotografía. Luego aparecerá otra pestaña (Figura D.5) donde se debe hacer clic en Set Seeds y colocar las “semillas” que son el punto de convergencia inicial de las iteraciones. Estas deben ser colocadas estratégicamente. No se recomienda colocarlas muy juntas y tampoco muy cerca de la frontera de la ROI. Al finalizar el procesamiento de esta etapa, es importante chequear que las iteraciones no hayan llegado al máximo establecido anteriormente.

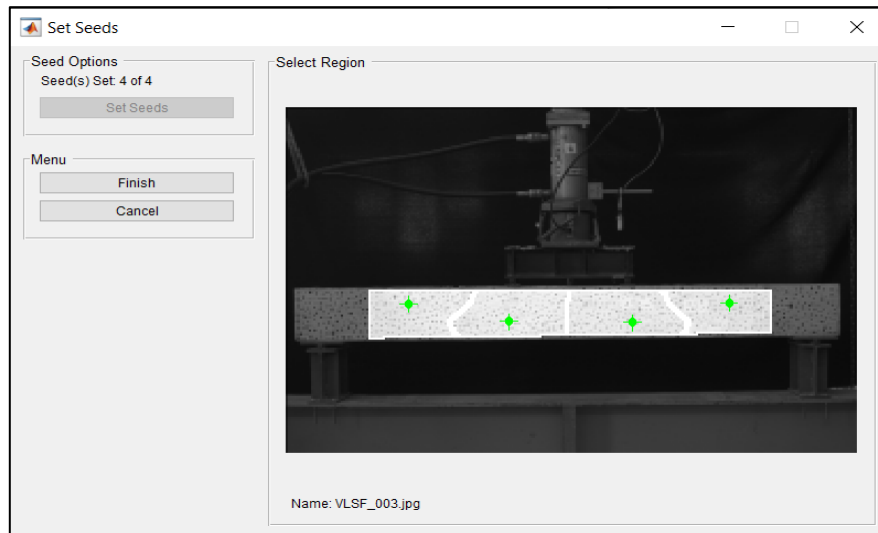


Figura D.5: Colocación de "semillas".

Luego de terminado el análisis, se procede a definir los parámetros de desplazamiento, entrando a Analysis > Format Displacements y luego haciendo clic en Get Unit Conversion para establecer la relación píxel/mm (Figura D.6). Se abrirá una nueva pestaña donde se da la opción de dibujar una línea de distancia conocida, como, por ejemplo, la altura de la viga.

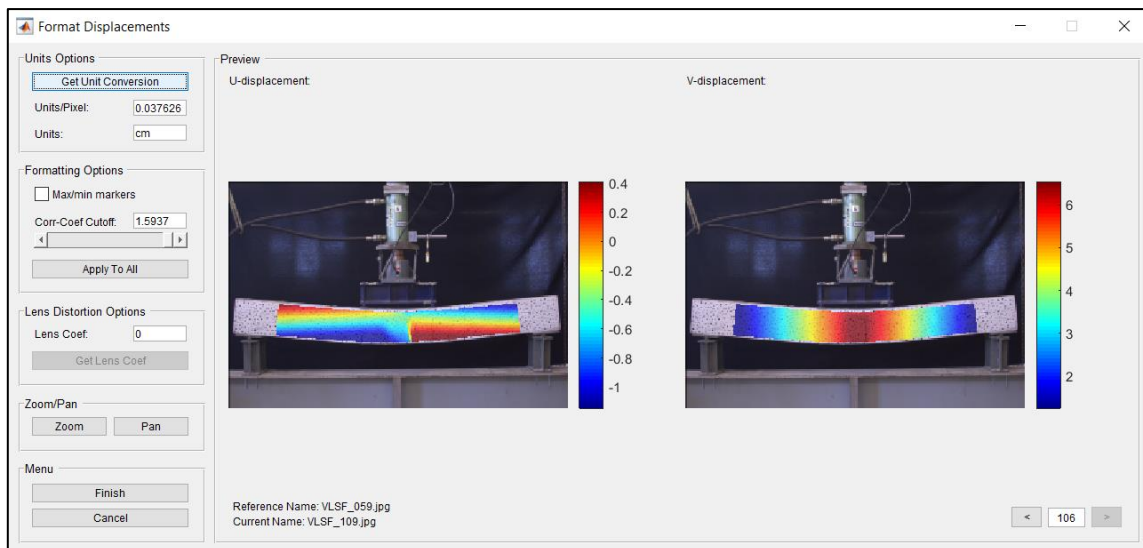


Figura D.6: Definir parámetros de desplazamiento.

Finalmente, para calcular las deformaciones, se debe ingresar en Analysis > Calculate Strains, donde aparecerá una pestaña (Figura D.7) con diferentes opciones a configurar, como el radio de deformación adecuado (Strain Radius), el método de cálculo (Lagrangiano o Euleriano) y la opción de un análisis discontinuo. Al finalizar, se puede acceder a los gráficos en la pestaña Plot

> View Displacement Plot o View Strains Plot, dependiendo de si queremos ver el desplazamiento o las deformaciones de nuestro analisis.

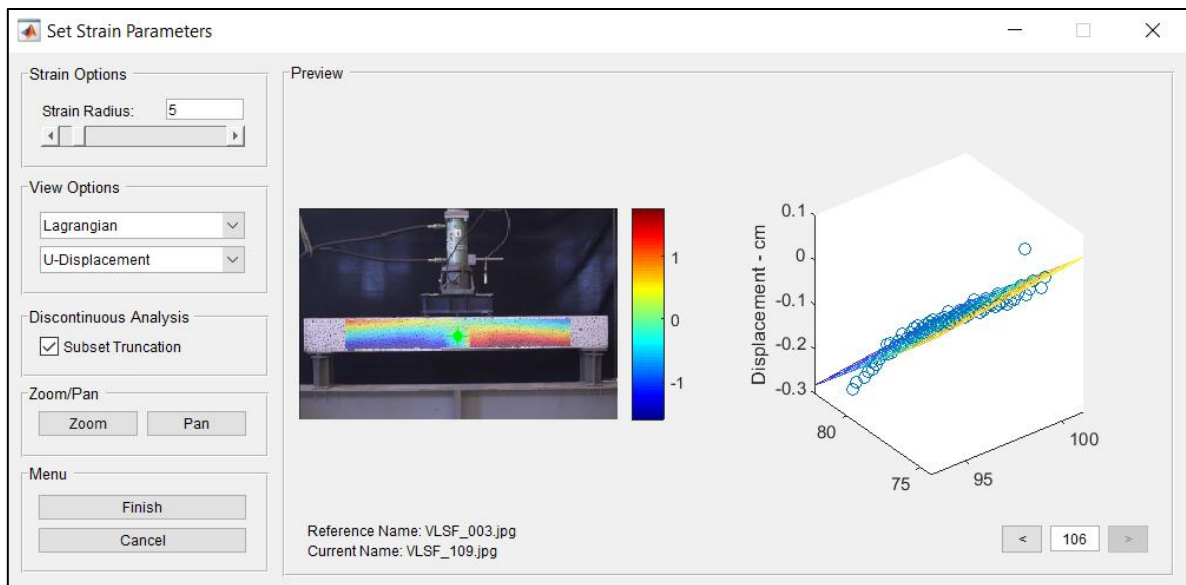


Figura D.7: Cálculo de deformaciones.