



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

# **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON MACROFIBRAS DE PVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**MARCELA ALEJANDRA HERRERA VOLLRATH**

PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FABIÁN ROJAS BARRALES  
CARLOS SEPÚLVEDA SORUCO

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: MARCELA HERRERA VOLLRATH  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: LEONARDO MASSONE S.

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON MACROFIBRAS DE PVA**

Hoy en día, el uso del hormigón reforzado con fibras tiene aplicaciones muy limitadas dentro del área de la construcción, las que se reducen comúnmente a pavimentos, losas y revestimientos de túneles. Con el fin de orientar su uso a elementos estructurales de mayor envergadura se necesitan de estudios que aporten información respecto a la incidencia que tienen las fibras en hormigones de diferentes composiciones. En particular, la fibra de polivinilo de alcohol (PVA) presenta diversos estudios en hormigones con alto contenido de finos o morteros, dejando de lado los áridos gruesos. A causa de lo anterior, el presente documento abarca un estudio detallado del efecto que provoca la fibra de PVA larga de 30mm en la matriz de hormigón, procurando incluir dos tipos de mezcla: áridos gruesos de tamaño máximo de 19mm y áridos finos de tamaño máximo 4.75mm; junto a tres volúmenes de fibra: 0%, 1.23% y 2%. Para el desarrollo de la investigación se construyeron 36 probetas cilíndricas y 12 probetas prismáticas, las que se destinaron a ensayos de tracción directa, compresión y flexión. El procesamiento de datos incluyó diagramas de esfuerzo-deformación y carga-deflexión, de donde se extrajeron tensiones máximas, deformaciones/deflexiones en el peak de tensión, deformaciones/deflexiones al 65% u 80% de degradación de la tensión máxima, módulos de elasticidad y energía post fisuración. Finalmente, el análisis de datos evidenció que las fibras de PVA largas provocaron un aumento de ductilidad en el hormigón, independiente del tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla. Sin embargo, el hormigón reforzado con fibras de PVA tuvo, en promedio, una respuesta dúctil 128% mayor en presencia de áridos gruesos. Adicionalmente, se observó que las fibras tendían a aumentar, en promedio, un 20% la resistencia máxima del hormigón con árido fino y, en presencia de áridos gruesos, aumentó en promedio 11% exhibiendo que el contenido óptimo de fibras que maximiza la resistencia es de 1.23%.

*A mis abuelos...*

## Agradecimientos

Quisiera detenerme un momento para agradecer a los profesores Leonardo Massone y Fabián Rojas, quienes aceptaron guiarme en este proceso investigativo con el cual decidí culminar mis estudios de pregrado. También agradecer a don Carlos Sepúlveda por involucrarse en el estudio del hormigón reforzado y por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo durante este último año en SIC.

Agradecer al profesor Pedro Soto, Jonathan, y en especial a mis compañeros Andrés y Santiago, en quienes encontré un lindo e inesperado grupo de apoyo, sin el cual no habría podido concretar este proceso.

Quiero destacar lo eternamente agradecida que estoy con los pilares fundamentales de mi vida: mis padres, Lidia y Marcelo, quienes con mucho esfuerzo me han apoyado incondicionalmente en cada una de las etapas que me ha tocado vivir, dándome el empujoncito inicial o la palabra de aliento necesaria para continuar mi camino; y mis hermanas, Camila y Pamela, que han compartido todo lo bello y lo no tan bello de esta vida conmigo, siendo parte importante de mis locuras.

Me gustaría agradecer a Amelia, Héctor y Javiera, quienes no solo me abrieron las puertas de su hogar en mis primeros años de universidad, sino que también me invitaron a ser parte de su familia en un momento donde la mía se encontraba a varios kilómetros de distancia.

No puedo dejar de mencionar a las amistades que he conocido a lo largo de mi vida y que han calado tan hondo en mi ser, que hoy por hoy llevo grabadas en la piel: Vicente, Fernanda y Carla, gracias por aguantarme, enfrentarme y darme el apoyo que tanto he necesitado desde el día uno. Espero de corazón haberles retribuido al menos un poquito de lo maravillosos que han sido conmigo.

Agradecer a mi gente importante: Constanza y Felipe, quienes fueron las fundaciones sobre las que comencé a construir mi paso por el departamento y terminaron siendo parte primordial en mi vida. A mis amistades de inducción, a los que se unieron en plan común, a mi gente de civil (incluyendo a los que eligieron el mal camino de la hidráulica) y en general a todas las personas que formaron parte de esta larga travesía que fue Beauchef, con quienes compartí cientos de aprendizajes y aventuras inolvidables, repito, inolvidables.

Quiero terminar agradeciéndole a toda mi familia que estuvo dándome su apoyo de alguna manera, particularmente a mis abuelos y abuelas que muchas veces cumplieron el rol de padres sin dudarlos, y a quienes hoy me gustaría dedicar este logro, sobre todo a los que de niña me prometieron compartir conmigo este día pero que lamentablemente ya no están en este plano, Carmen, Lidia, Pedro y Otto, esto es para ustedes.

Se despide,  
Barbie Constructora

\*mic drop\*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES DE ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
3.1	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN.....	2
3.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS PARA REFUERZO .....	3
3.3	COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (FRC).....	6
3.3.1	<i>Hormigón Reforzado con Fibras de PVA (PVA SNFRC)</i> .....	7
3.4	INFLUENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO EN LA MEZCLA .....	10
3.5	MODOS DE FALLA .....	11
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>13</b>
4.1	ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS .....	13
4.2	MEZCLA.....	13
4.2.1	<i>Árido</i> .....	13
4.2.2	<i>Fibra de Polivinilo de Alcohol (PVA)</i> .....	16
4.2.3	<i>Dosificaciones</i> .....	16
4.3	CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS .....	17
4.3.1	<i>Moldes</i> .....	17
4.3.2	<i>Preparación de Mezcla</i> .....	18
4.3.3	<i>Probetas</i> .....	20
4.4	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS .....	20
4.4.1	<i>Tracción Directa</i> .....	20
4.4.2	<i>Compresión</i> .....	21
4.4.3	<i>Flexión</i> .....	23
4.4.4	<i>Registro de Probetas Fabricadas</i> .....	24
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
5.1	ENSAYOS A TRACCIÓN DIRECTA.....	26
5.2	ENSAYOS A COMPRESIÓN .....	30
5.3	ENSAYOS A FLEXIÓN .....	33
5.4	COMPARACIÓN ENTRE ENSAYOS.....	39
5.4.1	<i>Tensiones Máximas</i> .....	39
5.4.2	<i>Ductilidad</i> .....	41
5.4.3	<i>Energía Post Fisuración</i> .....	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>47</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>48</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Propiedades típicas de fibras de refuerzo [3 – Table 1.1].	5
Tabla 3.2: Compendio de propiedades típicas de algunas fibras sintéticas para refuerzo [3 – Table 10.1].	8
Tabla 4.1: Materiales utilizados para el proyecto de investigación.	13
Tabla 4.2: Masa mínima de muestra para agregado grueso.	14
Tabla 4.3: Resultado análisis granulométrico del árido.	15
Tabla 4.4: Propiedades de la fibra de PVA – KURARAY.	16
Tabla 4.5: Dosificación de mezclas a utilizar.	16
Tabla 4.6: Dimensiones de moldes utilizados.	17
Tabla 4.7: Cantidad de probetas cilíndricas.	20
Tabla 4.8: Cantidad de probetas con forma de viguetas.	20
Tabla 4.9: Nomenclatura de probetas cilíndricas fabricadas.	25
Tabla 4.10: Nomenclatura de viguetas fabricadas.	25
Tabla 5.1: Resultados de ensayos a tracción directa.	27
Tabla 5.2: Resultados de ensayos a compresión.	31
Tabla 5.3: Resultados de ensayos de flexión.	34
Tabla 5.4: Tensiones residuales promedio para ensayos a flexión.	36
Tabla 5.5: Cuadro resumen de tensiones máximas de los ensayos.	39
Tabla 5.6: Cuadro resumen de deformaciones/deflexiones últimas de los ensayos.	41
Tabla 5.7: Cuadro resumen de energía post fisuración de los ensayos.	43
Tabla A.1: Resultados de granulometría para arena fina.	48
Tabla A.2: : Resultados de granulometría para arena gruesa.	49
Tabla A.3: Resultados de granulometría para gravilla.	49
Tabla B.4: Puntos de calibración LVDT 1.	53
Tabla B.5: Puntos de calibración LVDT 2.	53
Tabla B.6: Calibración final de los sensores LVDT.	53

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Curvas de esfuerzo-deformación unitaria a la compresión, típicas para concreto de densidad normal con $w_c=2300 \text{ kg/m}^3$ [1 – Fig. 2.3].	3
Figura 3.2: Diferentes tipos y tamaños de fibras [Manual Sika].	4
Figura 3.3: Diferentes formas de fibras [7 - Fig. 2.3.1].	4
Figura 3.4: Respuesta de “extracción de una sola fibra” o “single fibre pull out” [5 – Fig. 2].	6
Figura 3.5: Curva típica de esfuerzo-deformación del hormigón simple (a), FRC (b) y HPFRC (c) [3 – Fig. 1.1].	7
Figura 3.6: Fibra de PVA larga (a la izquierda) y corta (a la derecha).	8
Figura 3.7: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a compresión para volúmenes ( $V_{pf}$ ) del 0, 0.5, 1% y relaciones A/C de 0.45 (serie A) y 0.38 (serie B) [6 – Fig. 3 (a) y (e)].	9
Figura 3.8: Curva típica de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a tracción para un volumen del 2% [8 - Fig. 10].	9
Figura 3.9: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a flexión para volúmenes del 0, 1, 2 y 3% [5 - Fig.21].	10
Figura 3.10: Efecto del tamaño máximo del árido en compresión [9 – Fig. 4].	11
Figura 3.11: Modo de falla esperado para una probeta cilíndrica a tracción directa.	12
Figura 3.12: Modos de falla esperados para probetas cilíndricas a compresión [Manual - Control de calidad, edición n°409 (2017)].	12
Figura 3.13: Modos de falla esperados para una probeta prismática a flexión [1- Fig. 4.5].	12
Figura 4.1: Tamiz de latón.	14
Figura 4.2: Curva granulométrica del árido utilizado.	15
Figura 4.3: Moldaje cilíndrico y prismático.	17
Figura 4.4: Implementos necesarios para preparar la mezcla.	18
Figura 4.5: Probetas cilíndricas y prismáticas de hormigón reforzado con fibras de PVA.	19
Figura 4.6: Montaje de cilindros a tracción.	21
Figura 4.7: Rectificado de cilindros por IDIEM - Ercilla.	22
Figura 4.8: Montaje de cilindros a compresión.	22
Figura 4.9: Esquema del ensayo a flexión de viguetas.	23
Figura 4.10: Montaje de viguetas a flexión.	24
Figura 5.1: Modo de falla en probetas ensayadas a tracción directa.	27
Figura 5.2: Curvas de ensayos a tracción directa para mezclas de árido grueso M1.	28
Figura 5.3: Curvas de ensayos a tracción directa para mezclas de árido fino M2.	28
Figura 5.4: Distribución de fibras.	29
Figura 5.5: Modos de falla en probetas ensayadas a compresión.	30
Figura 5.6: Curvas de ensayos a compresión para mezclas de árido grueso M1.	31
Figura 5.7: Curvas de ensayos a compresión para mezclas de árido fino M2.	32
Figura 5.8: Modo de falla en probetas ensayadas a flexión.	33
Figura 5.9: Curvas de ensayos a flexión para mezclas de árido grueso M1.	34
Figura 5.10: Curvas de ensayos a flexión para mezclas de árido fino M2.	35
Figura 5.11: Tensiones residuales para mezclas de árido grueso M1.	37
Figura 5.12: Tensiones residuales para mezclas de árido fino M2.	37
Figura 5.13: Efecto puente en probetas ensayadas a flexión.	38
Figura 5.14: Variaciones porcentuales de tensiones máximas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M1.	40

Figura 5.15: Variaciones porcentuales de tensiones máximas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M2.....	40
Figura 5.16: Variaciones porcentuales de deformaciones últimas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M1. ....	42
Figura 5.17: Variaciones porcentuales de deformaciones últimas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M2. ....	42
Figura 5.18: Energía post fisuración alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con árido grueso M1. ....	44
Figura 5.19: Energía post fisuración alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con árido fino M2. ....	44
Figura B.1: Esquema de componentes internos del sensor LVDT.....	50
Figura B.2: Esquema de componentes externos del sensor LVDT. ....	50
Figura B.3: Primera lectura de LVDT 1. ....	51
Figura B.4: Segunda lectura de LVDT 1.....	51
Figura B.5: Primera lectura de LVDT 2.....	52
Figura B.6: Segunda lectura de LVDT 2.....	52



# 1 Introducción y motivación

El hormigón corresponde a uno de los componentes más utilizados en las construcciones chilenas, el cual se caracteriza principalmente por presentar una gran capacidad resistente a la compresión, pero no así a la tracción. Es por ello, que el hormigón común es bastante frágil y suele exhibir fisuras importantes con poca deformación, siendo su falla característica la “*falla frágil*”.

A causa de lo anterior, la ingeniería ha incorporado barras de acero dentro del hormigón con el objetivo de brindarle la ductilidad necesaria para resistir diferentes tipos de cargas, en especial las gravitacionales y cíclicas vinculadas a sismos o viento. Ahora bien, el acero es un material bastante costoso, por lo que, en el último tiempo se ha evidenciado un creciente interés de la industria por desarrollar nuevas tecnologías y/o materiales que sean útiles como refuerzo a un menor costo.

En este momento existen numerosas investigaciones en desarrollo sobre las denominadas “*fibras para refuerzo*”, que corresponden a elementos discontinuos que se añaden al hormigón con la finalidad de mejorar una o varias de sus propiedades mecánicas, y suelen constituirse de diversos tipos de material, formas y tamaños. Dentro de sus aplicaciones más características se encuentran los pavimentos y shotcrete para túneles. En particular, una de las fibras que menos estudios presenta hasta la fecha, y mayor potencial tiene, es la fibra sintética de Polivinilo de Alcohol larga, o también llamada fibra de PVA por sus siglas en inglés “*Polyvinyl Alcohol*”. Estos estudios se han enfocado principalmente en morteros, lo que motiva especialmente el desarrollo de la presente memoria, donde se estudiará la incorporación de diferentes volúmenes de fibra de PVA larga en mezclas con árido grueso y árido fino, procurando cuantificar la incidencia real que tienen las fibras sobre la resistencia y ductilidad del hormigón reforzado, por medio de ensayos de tracción directa, compresión y flexión.

El presente documento incluye una revisión bibliográfica de los temas relevantes a tratar, la metodología experimental realizada, análisis y resultados obtenidos, finalizando con las conclusiones más interesantes exhibidas durante el desarrollo de la investigación. Cabe destacar que esta memoria de título se realizó en base a los trabajos de tesis de Jaime Reveco, 2021, “*Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA*”, y la memoria de Alejandro Arenas, 2021, “*Caracterización de la respuesta a tracción de hormigón reforzado con fibras de PVA*”. Ambos utilizaron fibras de PVA cortas de 12mm, siendo esta la variable que marca la diferencia, ya que en la presente investigación se utilizaron fibras de PVA largas de 30mm.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

La presente investigación busca estudiar la incidencia de diferentes volúmenes de macrofibras de PVA en la resistencia y ductilidad de probetas de hormigón reforzado, por medio del análisis de ensayos a compresión, tracción directa y flexión, según corresponda.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Construir probetas cilíndricas y prismáticas con diferentes cuantías de fibras de PVA.
- Realizar ensayos de compresión, tracción directa y flexión a las probetas.
- Comparar diagramas de Tensión-Deformación o Carga-Desplazamiento para las diferentes cuantías de fibra.
- Analizar la influencia del tamaño máximo del árido para diferentes cuantías de fibra.

## **3 Antecedentes de Estudio**

En este capítulo se realiza una revisión general de la bibliografía con la finalidad de dar al lector una noción del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de Polivinilo de Alcohol (PVA FRC) permitiendo, de esta manera, conocer posibles resultados o conclusiones que se puedan obtener a partir del desarrollo de la investigación.

### **3.1 Propiedades Mecánicas del Hormigón**

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizado en obras civiles alrededor del mundo, el cual se obtiene a partir de la mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena, grava, agua y otros agregados o aditivos, tales como, plastificantes, acelerantes o retardadores. El resultado de la mezcla anterior es una masa sólida derivada de la interacción química que ocurre entre las partículas de los componentes, destacando cuidados especiales durante su etapa de endurecimiento como el control de las condiciones de humedad y temperatura según la normativa vigente [1].

Dependiendo de las cantidades de los componentes incorporados en la mezcla se obtendrán variaciones en las propiedades del hormigón como, por ejemplo, aquella que posea una mayor cantidad de agua tendrá una mayor trabajabilidad, pero menor resistencia a la compresión. Es esta última propiedad la de mayor importancia, ya que el hormigón se caracteriza principalmente por presentar una gran capacidad de resistencia a la compresión, pero no así a la tracción [1].

El hormigón común suele alcanzar su resistencia máxima ( $f'_c$ ) a los 28 días, su valor varía entre los 5-60 (MPa) y posee una baja capacidad de deformación, lo que implica una baja ductilidad que induce a fallas frágiles posterior a la fisuración. Por ello, dependiendo de la aplicación y uso que se le dé, el hormigón puede ser reforzado con otros elementos para alcanzar mayores ductilidades, como lo son las fibras o las barras de acero, las cuales son comúnmente utilizadas debido a su gran capacidad de resistencia a la tracción [1].

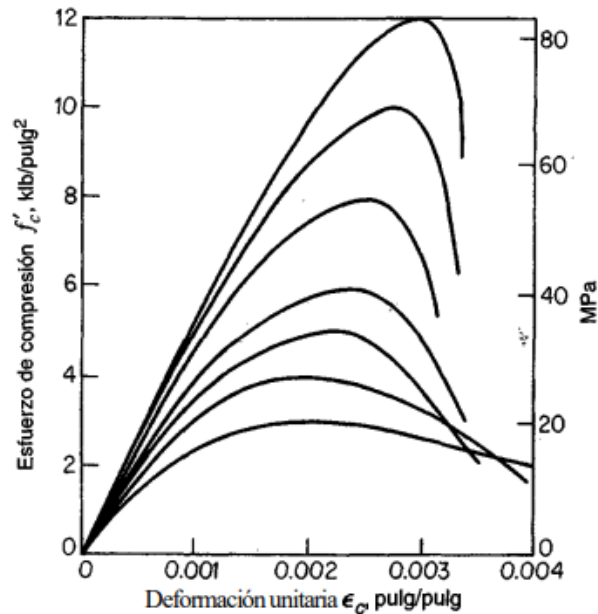
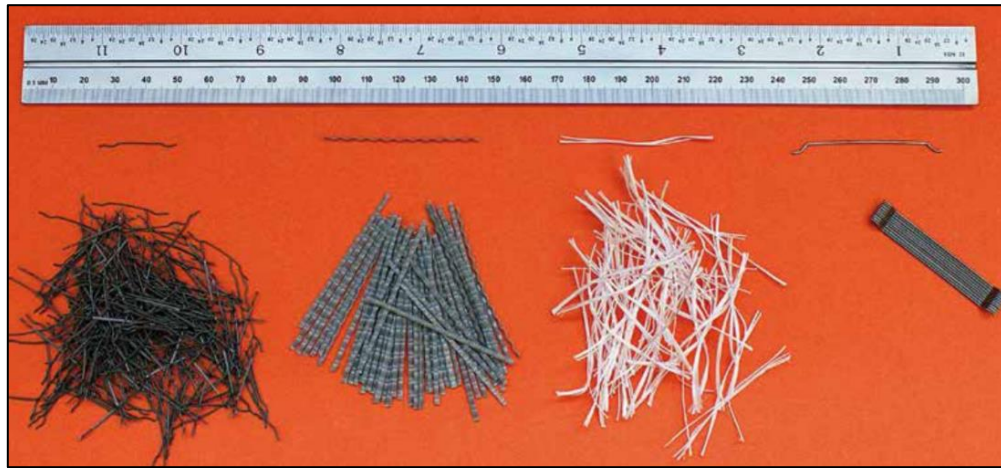


Figura 3.1: Curvas de esfuerzo-deformación unitaria a la compresión, típicas para concreto de densidad normal con  $w_c=2300 \text{ kg/m}^3$  [1 – Fig. 2.3].

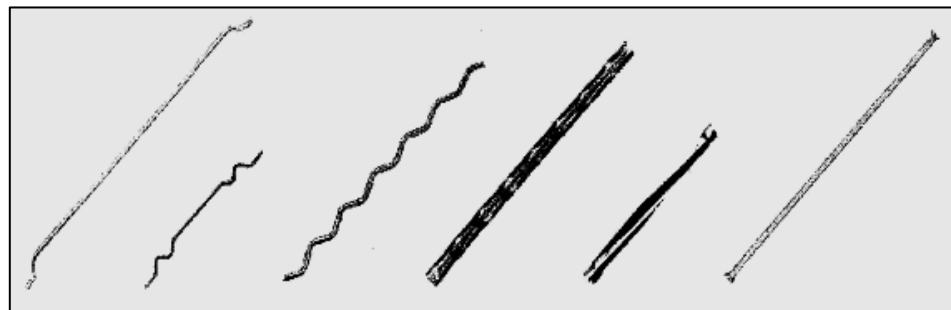
### 3.2 Propiedades Mecánicas de las Fibras para Refuerzo

Las fibras son elementos discontinuos que se distribuyen aleatoriamente en las mezclas de aglomerantes, su uso se remonta desde hace miles de años atrás y buscan mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla en su estado sólido. Su primera aparición moderna fue a comienzos del siglo XX con el asbesto, pero con el tiempo se descubrió su efecto negativo sobre la salud de las personas y se dejó de utilizar. No obstante, en la segunda mitad del siglo XX comenzaron las primeras investigaciones para evaluar el potencial de las fibras de diversas geometrías compuestas por otro tipo de materiales, como el acero y el vidrio. Estas investigaciones se enfocaron principalmente en las mezclas de fibras con el aglomerante más utilizado en construcción: el hormigón; cuya mixtión se denominó “*Hormigón Reforzado con Fibras*” o “*FRC*” por sus siglas en inglés “*Fibre Reinforced Concrete*” [4].



**Figura 3.2: Diferentes tipos y tamaños de fibras [Manual Sika].**

La eficiencia de un tipo particular de fibra dependerá de su forma, de las propiedades intrínsecas de su material de fabricación y el tipo de unión que tenga con la matriz, razón por la cual hoy se pueden encontrar numerosos tipos de fibras para uso comercial y experimental, tales como, metálicas (SFRC – “Steel Fibre Reinforced Concrete”), sintéticas (SNFRC – “Synthetic Fibre Reinforced Concrete”), de vidrio (GFRC – “Glass Fibre Reinforced Concrete”), naturales (NFRC – “Natural Fibre Reinforced Concrete”), con disposiciones individuales o agrupadas, diferentes largos y terminaciones, ya sean, lisas, con gancho o deformadas [3 – Chap. 2.2].



**Figura 3.3: Diferentes formas de fibras [7 - Fig. 2.3.1].**

En la Tabla 3.1 se pueden observar las propiedades mecánicas típicas de las fibras de refuerzo más utilizadas en el mercado.

**Tabla 3.1: Propiedades típicas de fibras de refuerzo [3 – Table 1.1].**

Tipo de Fibra	Diámetro (μm)	Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracción (GPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Deformación última (%)
Acero	100-1000	7.84	0.5-2.6	210	0.5-3.5
Vidrio	9-15	2.6	70-80	2-4	2-3.5
Crocidolita de asbesto	0.02-0.4	3.4	196	3.5	2.0-3.0
Crisolito de asbesto	0.02-0.4	2.6	164	3.1	2.0-3.0
Polipropileno	20-400	0.9-0.95	0.45-0.76	3.5-10	15-25
Aramida (Kevlar)	10-12	1.44	2.3-3.5	63-120	2-4.5
Carbón	8-9	1.6-1.7	2.5-4.0	230-380	0.5-1.5
Nylon	23-400	1.14	0.75-1.0	4.1-5.2	16-20
Celulosa	-	1.2	10	0.3-0.5	-
Acrílico	20-350	1.16-1.18	0.2-1.0	14-19	10-50
Polietileno	25-1000	0.92-0.96	0.08-0.60	5	3-100
Madera	-	1.5	71	0.9	-
Sisal	10-50	1.5	-	0.8	3.0
Matriz de Cemento	-	1.5-2.5	0.003-0.007	10-45	0.03

Nota: Valores varían según fabricante.

La relación fibra-matriz es una característica importante para el buen rendimiento del hormigón reforzado con fibras (FRC) y, por esta razón, se puede indagar en el comportamiento que exhibe la unión de la fibra y su matriz a lo largo de un proceso de aplicación de cargas. Para ello, existe el análisis de “*extracción de una sola fibra*” o “*single fibre pull out*”, el cual, como explican Khan y Ayub [5], puede describir la variación de esta unión en tres segmentos (ver Figura 3.4):

- 1) Etapa inicial: donde actúa principalmente la deformación elástica de la fibra semi despegada producto de la separación estable entre la fibra y la matriz. Se observará este comportamiento hasta el punto de carga de desprendimiento ( $P_a$ ).
- 2) Etapa intermedia: donde se observa una caída desde el punto de carga de desprendimiento ( $P_a$ ) hasta el punto de carga de extracción al que la fibra se acaba de despegar ( $P_b$ ), demostrando así la separación completa entre la fibra y la matriz.
- 3) Etapa final: donde la fibra puede presentar una respuesta de “endurecimiento por deformación o deslizamiento” ( $\beta > 0$ ), “fricción constante” ( $\beta = 0$ ) o “ablandamiento por deformación o deslizamiento” ( $\beta < 0$ ).

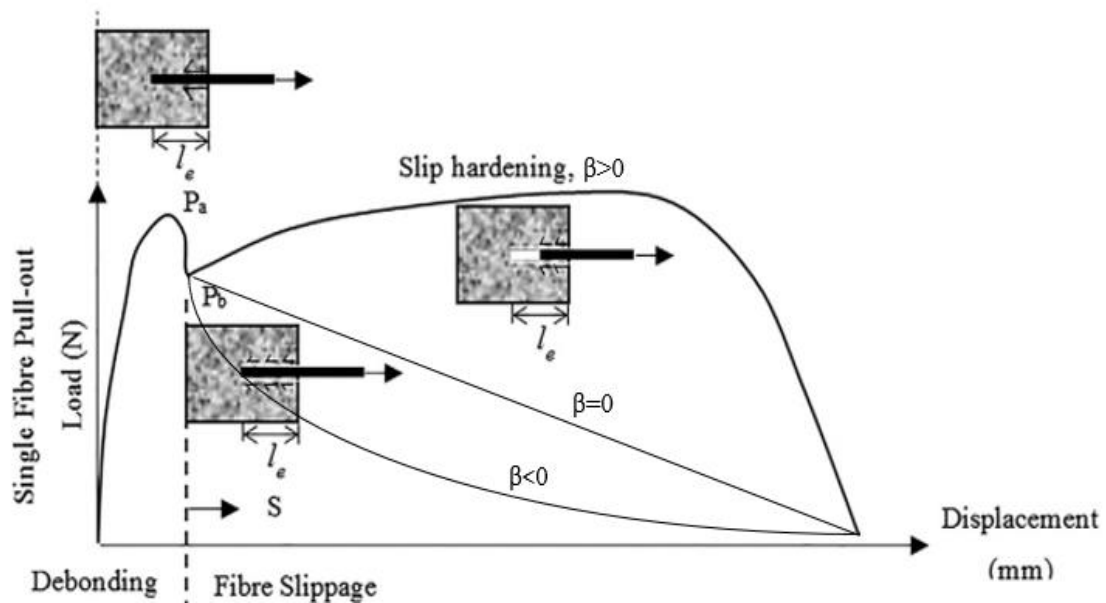


Figura 3.4: Respuesta de “extracción de una sola fibra” o “single fibre pull out” [5 – Fig. 2].

### 3.3 Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibras (FRC)

Por lo general, las fibras se incorporan en el hormigón con el objetivo de mejorar una o varias de sus propiedades, entre las cuales destacan: la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la resistencia al agrietamiento, el control de grietas, la ductilidad, la durabilidad, su vida útil a la fatiga, la resistencia al impacto y abrasión, la fisuración, sus características térmicas y resistencia al fuego [4].

Según Bentur. A. y Mindess S. [3], dependiendo del material de la fibra utilizada, su geometría y volumen incorporado en la matriz, se evidencian tres comportamientos característicos (ver Figura 3.5): hormigón simple (a), hormigón reforzado con fibras (b) y hormigón reforzado con fibras de alto rendimiento (c).

- Caso (a) – Hormigón simple: se observa una respuesta frágil sin fibra.
- Caso (b) – FRC: se observa que las fibras proporcionan ductilidad al hormigón manteniendo una disminución en las tensiones post peak de fisuración, por lo que, se deduce que este tipo de compuesto presenta una respuesta de “*ablandamiento por deformación*”. Sin embargo, en el caso de que la curva continúe con la caída de tensiones alcanzando asíntotas horizontales que signifiquen un aumento considerable en la deformación, su respuesta cambia a una de “*endurecimiento por deformación*”. En este caso las fibras tienden a exhibir volúmenes menores al 2% y constituyen un refuerzo secundario. Los FRC suelen aplicarse, principalmente, en el control de grietas en losas y pavimentos.

- Caso (c) – HPFRC: se observa que las fibras contribuyen en el aumento de la resistencia y tenacidad post peak de fisuración, por lo que, se deduce que este tipo de compuesto presenta una respuesta de “*endurecimiento por deformación*”. Este comportamiento se asocia a volúmenes de fibra del 5% o más, sin embargo, las nuevas generaciones de HPRFC están logrando el mismo efecto por un menor volumen de fibras. En este tipo de hormigón, las fibras constituyen un refuerzo primario y suelen aplicarse en elementos que deben soportar grandes cargas o deformaciones locales, como revestimiento de túneles, estructuras resistentes a explosiones o pilotes prefabricados.

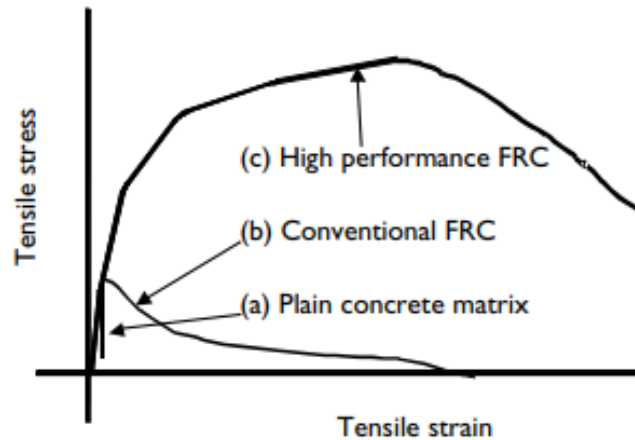


Figura 3.5: Curva típica de esfuerzo-deformación del hormigón simple (a), FRC (b) y HPFRC (c) [3 – Fig. 1.1].

### 3.3.1 Hormigón Reforzado con Fibras de PVA (PVA SNFRC)

Teóricamente, para aumentar la resistencia del hormigón convencional, las fibras deben tener un módulo de elasticidad mayor que el de la matriz, lo que dificulta el uso de la mayoría de las fibras sintéticas debido a que presentan elasticidades menores a la de los hormigones más utilizados (ver Tabla 3.2). Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que, incluso con bajos módulos de elasticidad en fibras sintéticas, se pueden obtener mejoras considerables con respecto a la capacidad de deformación, tenacidad, resistencia a la compresión y control de grietas de los SNFRC. En la mayoría de las aplicaciones, la mejora de estas propiedades es de mayor importancia que un leve aumento en la resistencia a la tracción o flexión [3 – Chap. 10.1].

**Tabla 3.2: Compendio de propiedades típicas de algunas fibras sintéticas para refuerzo [3 – Table 10.1]**

Tipo de Fibra	Diámetro (μm)	Gravedad Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a Tracción (GPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Deformación última (%)
Acrílico	20-350	1.16-1.18	0.2-1.0	14-19	10-50
Nylon	23-400	1.14	0.75-1.0	4.1-5.2	16-20
Polipropileno	20-400	0.9-0.95	0.45-0.76	3.5-10	15-25
<b>Polivinilo de Alcohol (PVA)</b>	<b>14-650</b>	<b>1.3</b>	<b>0.8-1.5</b>	<b>10-45</b>	<b>3-6</b>
Acero (para comparación)	100-1000	7.84	0.5-2.6	210	0.5-3.5
Matriz de Cemento	-	1.5-2.5	0.003-0.007	10-45	0.03

Nota: Valores varían según fabricante.

Dentro de la clasificación de fibras sintéticas se encuentran aquellas denominadas fibras de “*Polivinilo de Alcohol*” (PVA, por sus siglas en inglés “*Polyvinyl Alcohol*”) que corresponden a un polímero sintético cuyo módulo de elasticidad oscila entre 10-45 (GPa) y posee una resistencia a la tracción que varía entre 0.8-1.5(GPa) llegando a alcanzar deformaciones últimas entre 3-6% [3].



**Figura 3.6: Fibra de PVA larga (a la izquierda) y corta (a la derecha).**

El caso particular del hormigón reforzado con fibras de PVA (PVA SNFRC), demuestra que estas últimas solo actúan cuando el hormigón comienza su etapa de agrietamiento o fisuración, por lo que, independiente del volumen de fibra utilizado, la parte elástica del diagrama esfuerzo-deformación será muy similar hasta aproximadamente el 80% de la tensión máxima para diferentes volúmenes de fibra (ver Figura 3.7).

Por su parte, la resistencia máxima a la compresión de PVA SNFRC aumenta ligeramente con el incremento del contenido de fibras y, a su vez, la pendiente de la etapa plástica de la curva de esfuerzo-deformación disminuye en función del aumento del volumen de fibra utilizado (ver Figura 3.7), lo que demuestra una mejora en la ductilidad del hormigón gracias a las fibras [6].



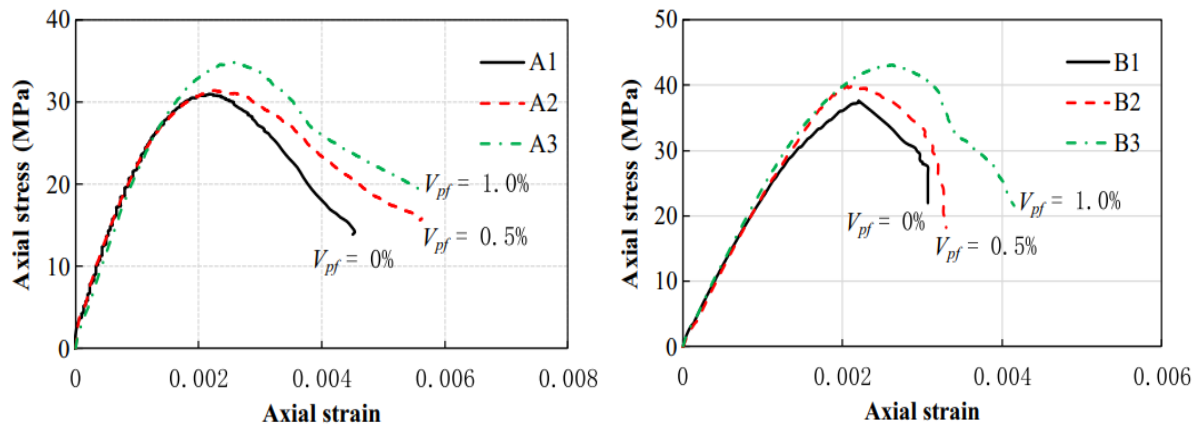


Figura 3.7: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a compresión para volúmenes ( $V_{pf}$ ) del 0, 0.5, 1% y relaciones A/C de 0.45 (serie A) y 0.38 (serie B) [6 – Fig. 3 (a) y (e)].

Según mencionan algunas investigaciones [3 - 8], la adición de fibra de PVA a la mezcla de hormigón provoca una respuesta de “*endurecimiento por deformación*” en su etapa plástica (ver Figura 3.8), lo que indica que, dependiendo del volumen de fibra utilizado, se podrá clasificar como: hormigón reforzado común u hormigón reforzado con fibras de alto rendimiento.

Asimismo, se ha observado que la trabajabilidad de la mezcla de PVA SNFRC se ve afectada por la incorporación de fibras, razón por la cual se aconseja utilizar aditivos plastificantes para evitar complicaciones en este aspecto [8].

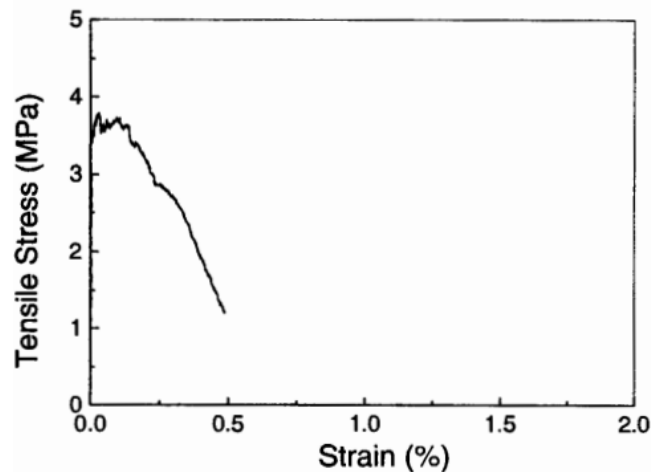


Figura 3.8: Curva típica de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a tracción para un volumen del 2% [8 - Fig. 10].

Algunos estudios indican que en las curvas de tensión-deformación o carga-desplazamiento de ensayos a flexión, se observa un comportamiento similar al antes mencionado, y es que en la etapa elástica de PVA SNFRC se ausentan las fibras dejando solo actuar a la matriz de hormigón hasta su fisuración, donde, dependiendo del volumen de fibra, aumenta levemente la resistencia máxima. Posterior al peak de agrietamiento, vale decir, en su etapa plástica, se exhibe un comportamiento de “*endurecimiento por deformación o deslizamiento*”, donde disminuye la carga

que se comienza a distribuir entre la matriz agrietada y la fibra (ver Figura 3.9). Notar que a mayor volumen de fibra, mayor es la resistencia máxima y menor es la caída en su etapa plástica, haciendo del PVA SNFRC más dúctil.

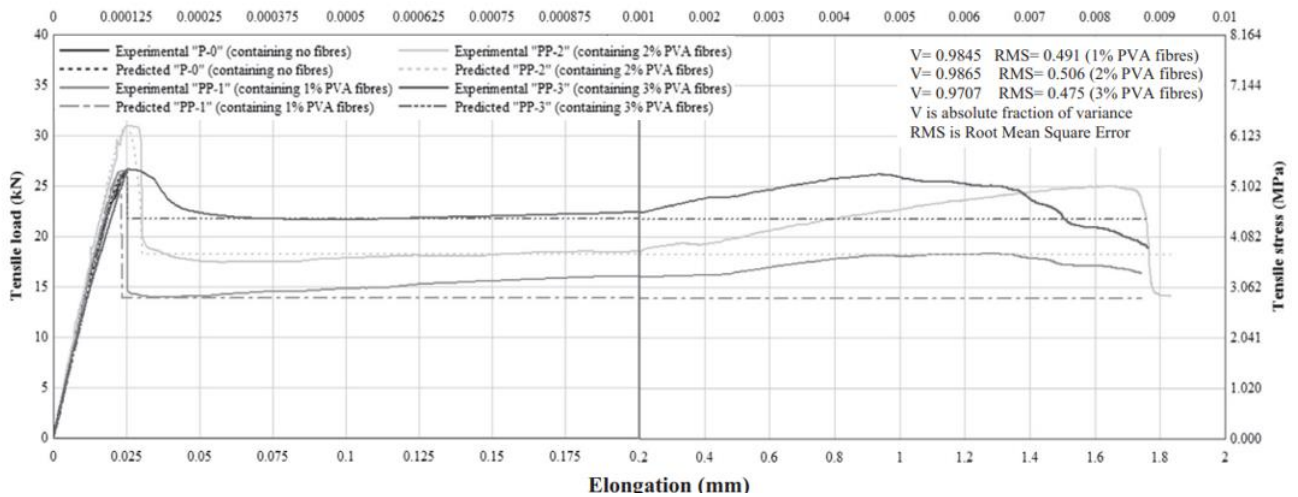


Figura 3.9: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC a flexión para volúmenes del 0, 1, 2 y 3% [5 - Fig.21].

Cabe destacar que, en la investigación realizada por Khan y Ayub [5], se informa que tanto el hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) como el hormigón reforzado con fibras sintéticas de PVA (PVA SNFRC) tienen respuesta de “*endurecimiento por deformación*”. Sin embargo, se advierte que el SFRC alcanza mayores resistencias a la tracción que el PVA SNFRC. Este punto podría motivar el uso de las fibras de acero por sobre las de PVA, no obstante, estas últimas tienen varias ventajas frente a su par de acero, tales como el menor costo producto de la menor densidad, mejor comportamiento frente a la corrosión y menor requerimiento de aglutinante para el mismo volumen de fibra, lo que deriva en un interés creciente por estudiar PVA SNFRC para aplicaciones estructurales.

### 3.4 Influencia del Tamaño Máximo del Árido en la Mezcla

Según Bentur, A. y Mindess, S. [3 – Chapter 7], la clasificación es la distribución de partículas de materiales granulares entre varios tamaños, generalmente expresada en términos de porcentajes acumulativos mayores o menores que cada uno de los tamaños de aberturas de tamices, cuya especificación se detalla en la ASTM-C 33. Existen varias razones para definir los límites de clasificación y el tamaño máximo de los agregados, siendo la más importante la trabajabilidad de la mezcla.

El tamaño máximo del agregado se designa por el tamaño del tamiz en el que se retiene el 15% o más de partículas, limitándose el tamaño máximo para hormigones de alta resistencia en 19 (mm). En general, cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menos será la superficie por unidad de volumen que ha de cubrir la pasta de cemento de una determinada relación agua/cemento, lo que se traduce en un ahorro económico [2].

Para analizar el efecto del tamaño máximo del árido sobre la resistencia a la compresión de un hormigón convencional, un estudio fabricó probetas donde incorporan agregados de entre 2.36-15(mm). Los resultados de los ensayos indican que con el aumento del tamaño máximo del árido aumenta la resistencia a la compresión hasta aproximadamente los agregados de 7 (mm), observándose luego un efecto poco significativo de este factor en la capacidad de compresión (Figura 3.10). Se deduce, entonces, que existe un tamaño de árido óptimo para la mezcla de hormigón común [9].

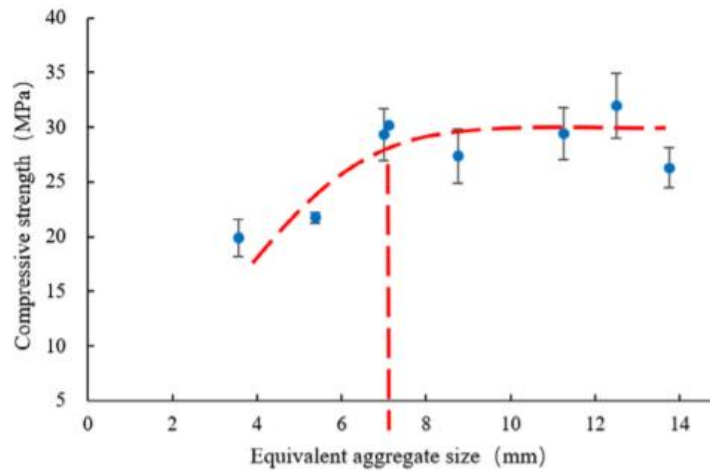


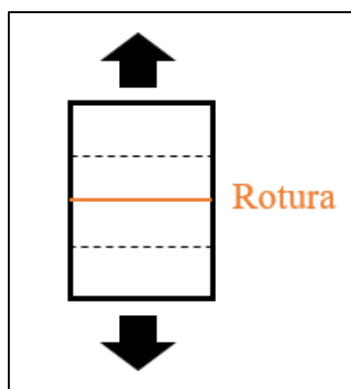
Figura 3.10: Efecto del tamaño máximo del árido en compresión [9 – Fig. 4].

Ahora bien, existen investigaciones específicas de PVA SNFRC con diferentes tamaños máximos de áridos que indican que la respuesta de endurecimiento por deformación con alta ductilidad se puede lograr en concretos con agregados gruesos, siendo este factor la razón de una mayor tenacidad a la fractura y una respuesta de fisuración simple [5].

### 3.5 Modos de falla

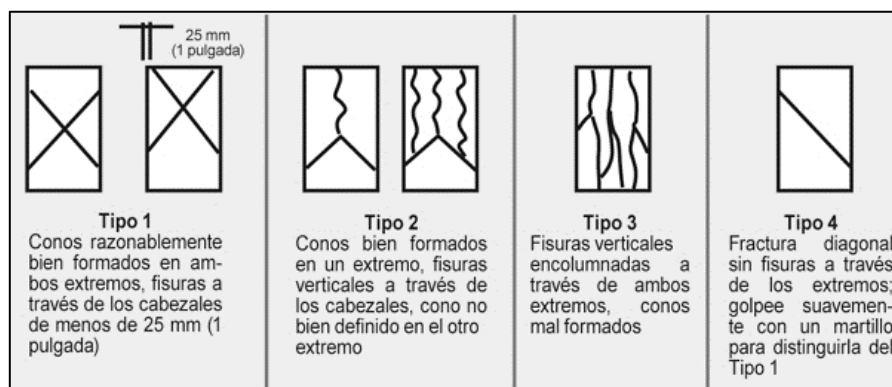
Para asegurar la confiabilidad de los ensayos, se deben conocer las fallas esperadas en cada una de las probetas según los controles de calidad correspondiente. Para ello, en este apartado se muestran los modos de falla de probetas ensayadas de tracción directa, compresión y flexión.

- Ensayos de Tracción Directa: El modo de falla esperado para ensayos de tracción directa corresponde a una grieta horizontal, la cual debe estar ubicada en el tercio central del cilindro (ver Figura 3.11).



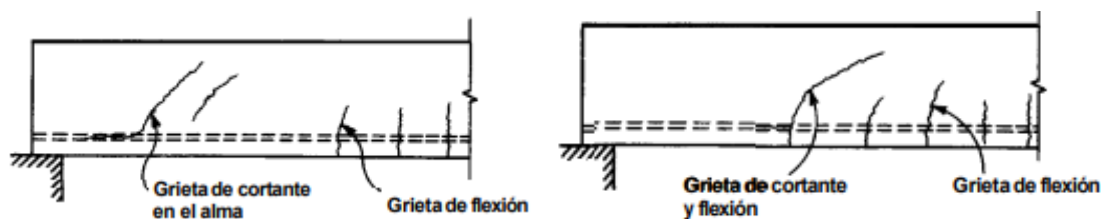
**Figura 3.11: Modo de falla esperado para una probeta cilíndrica a tracción directa.**

- Ensayos de Compresión: Los modos de falla esperados para ensayos de compresión corresponden grietas diagonales y/o verticales, las cuales se detallan en la Figura 3.12.



**Figura 3.12: Modos de falla esperados para probetas cilíndricas a compresión [Manual - Control de calidad, edición n°409 (2017)].**

- Ensayos de Flexión: Los modos de falla esperados para ensayos de flexión corresponden a grietas horizontales en el centro de la luz, causadas por el efecto de la flexión pura del ensayo, y/o grietas diagonales ubicadas entre el apoyo y el centro de la luz, producidas por el efecto de corte que se produce por el mismo ensayo (ver Figura 3.13).



**Figura 3.13: Modos de falla esperados para una probeta prismática a flexión [1- Fig. 4.5].**

## 4 Metodología Experimental

En el presente capítulo se detallan los materiales e instrumentos utilizados durante el proceso de fabricación de mezclas, construcción y ensayo de probetas. Adicionalmente, se describen los montajes requeridos para llevar a cabo cada uno de los ensayos estipulados.

### 4.1 Especificación de los Elementos Utilizados

A modo general, en la Tabla 4.1 se mencionan los materiales adquiridos para llevar a cabo el proyecto de investigación. Junto a ellos, se observa una pequeña especificación de su respectiva procedencia.

**Tabla 4.1: Materiales utilizados para el proyecto de investigación.**

<b>Material</b>	<b>Especificación</b>
Cemento	Polpaico para usos generales
Arena Fina	Áridos Rio Maipo
Arena Gruesa	Áridos Rio Maipo
Gravilla	Áridos Rio Maipo, tamaño max. 19mm
Fibra de PVA	Fibra KURARAY Co., Ltd. Clase II, largo 30mm
Aditivo Plastificante	Sika Viscocrete 5200 cl
Agua	Potable de grifo
Desmoldante de Metal	Topex 5.6 L
Adhesivo Epóxico Multipropósito	Sikadur – 31 HMG
Adhesivo Instantáneo	Loctite 495

### 4.2 Mezcla

Para formular la mezcla de hormigón reforzado se necesita: cemento, áridos gruesos y/o finos, fibras de PVA, aditivo plastificante y agua. En este apartado se describen particularmente las dosificaciones, áridos y fibra utilizada en la investigación.

#### 4.2.1 Árido

Para obtener una caracterización detallada del árido a utilizar en las mezclas de hormigón, se debe seguir el procedimiento indicado en la norma ASTM-C 136, la cual menciona que por medio de tamices estandarizados por la norma ASTM E11, hay que realizar un análisis granulométrico del agregado fino y grueso.

Con el objetivo de que la muestra sea lo más representativa posible, primero se debe homogeneizar el material por medio de un cuarteado y, dependiendo del tamaño máximo de

partícula que presente, hay que extraer como mínimo 300g para un agregado fino o lo indicado en la Tabla 4.2 para un agregado grueso.

**Tabla 4.2: Masa mínima de muestra para agregado grueso.**

<b>Tamaño nominal máximo (mm)</b>	<b>Masa mínima de la muestra de Ensayo (kg)</b>
63.0	35
50.0	20
37.5	15
25.0	10
19.0	5
12.5	2
9.5	1

Del árido utilizado para esta investigación se extrajeron: 500g de arena fina, 500g de arena gruesa y, dado que el tamaño máximo nominal de la grava es de 19mm, se apartaron 5kg de agregado grueso. Luego, para determinar el contenido de humedad de las muestras se dejaron por 24 horas en el horno a 110°C para asegurar su secado. Se registraron los pesos antes y después de secar las muestras, obteniendo 4.8 y 4.5% de humedad para arena fina y gruesa, respectivamente.

Para realizar el análisis granulométrico se necesitan tamices estandarizados, los cuales se componen por un paño de cedazo o malla montada sobre un marco sólido que permite contener el material dentro de éste (ver Figura 4.1). Los tamices se caracterizan por tener mallas de diferentes aperturas, las cuales indican el tamaño del material que retienen, permitiendo así obtener el detalle de los diferentes tamaños de agregados que componen la muestra.



**Figura 4.1: Tamiz de latón.**

A partir del tamizado de cada una de las muestras extraídas se obtuvo el análisis granulométrico indicado en la Tabla 4.3, el cual se puede observar gráficamente en la Figura 4.2. Notar que el detalle de los resultados obtenidos del análisis granulométrico se encuentra en el Anexo A.

Tabla 4.3: Resultado análisis granulométrico del árido.

Tamiz N°	Diámetro [mm]	% Que pasa		
		Arena Fina	Arena Gruesa	Gravilla
2 ½"	63.0	100%	100%	100%
2"	50.0	100%	100%	100%
1 ½"	37.5	100%	100%	100%
1"	25.0	100%	100%	100%
¾"	19.0	100%	100%	93%
½"	12.5	100%	100%	42%
3/8"	9.5	100%	100%	19%
#4	4.75	97%	86%	2%
#8	2.36	95%	61%	0%
#10	2.00	94%	55%	0%
#30	0.600	91%	24%	0%
#40	0.425	89%	17%	0%
#50	0.300	83%	11%	0%
#100	0.150	42%	4%	0%
#200	0.075	10%	1%	0%

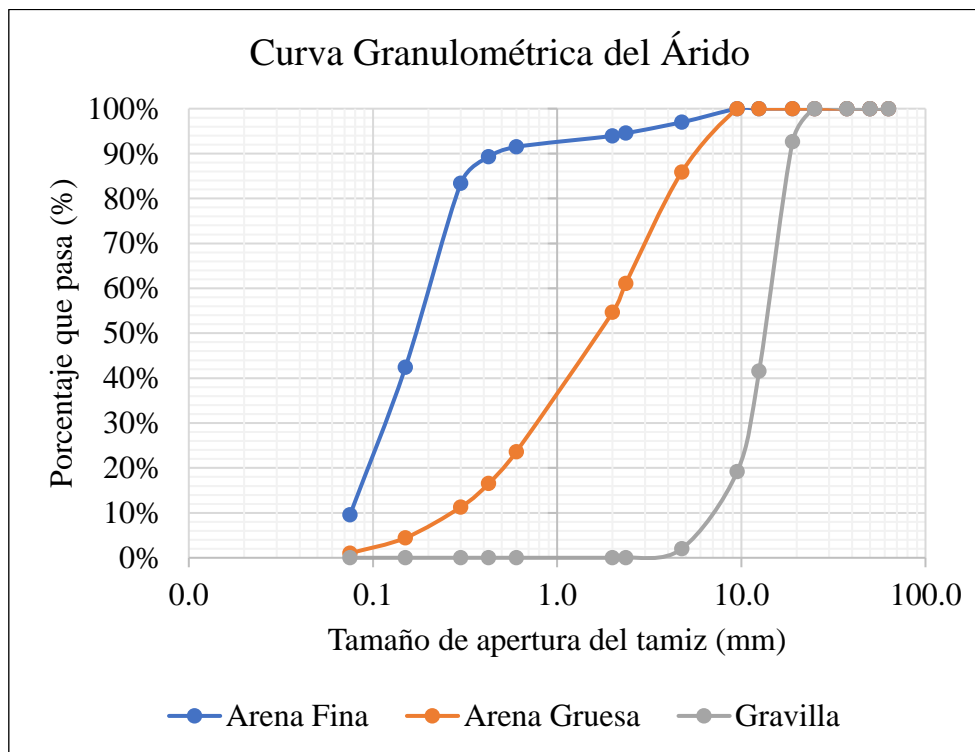


Figura 4.2: Curva granulométrica del árido utilizado.

#### 4.2.2 Fibra de Polivinilo de Alcohol (PVA)

Tal como se mencionó anteriormente, la fibra de PVA utilizada corresponde a una Fibra KURARAY Co., Ltd. Clase II de 30mm, siendo añadida en diferentes cuantías con respecto al volumen de hormigón. Sus propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Propiedades de la fibra de PVA – KURARAY.

Diámetro (mm)	Largo (mm)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0.66	30	820	12.7	1190

#### 4.2.3 Dosificaciones

En cuanto a las dosificaciones trabajadas, se optó por materializar 2 de las 3 dosificaciones que utilizó A. Arenas en su trabajo, las cuales buscan diferenciar el comportamiento del hormigón reforzado según el tamaño máximo del árido. Para ello, se seleccionó la mezcla 1 (M1) que contiene arena fina, arena gruesa y gravilla; y la mezcla 2 (M2) que solamente contiene arena fina y arena gruesa. El detalle de las dosificaciones se puede observar en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Dosificación de mezclas a utilizar.

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)
1	796	406	980	637	477	19
2	796	406	0	1197	898	4.75

En cuanto a los volúmenes de fibra, se mantienen los estudiados por A. Arenas y J. Reveco, los cuales corresponden a: 0%, 1.23% y 2%.

Ahora bien, la relación agua/cemento utilizada por J. Reveco corresponde a 0.45 A/C para ambas mezclas, por otro lado, A. Arenas utilizó 0.45 A/C para M1 y 0.51 A/C para M2 producto de que la trabajabilidad de la mezcla disminuye considerablemente con el aumento de volumen de fibra y la disminución de gravilla. Por lo anterior, para esta investigación se utilizó una relación de 0.51 A/C para ambas mezclas con 5 (ml) de aditivo plastificante cada 1820 (cm<sup>3</sup>) de hormigón.

Cabe destacar que, dentro de la estimación del gramaje de áridos finos y agua está considerada la influencia del alto contenido de humedad que presentaron las arenas.



### 4.3 Construcción de probetas

En este apartado se describe el procedimiento de confección de probetas de hormigón reforzado con fibras y se detalla la cantidad de las probetas fabricadas según tipo de mezcla y volumen de fibra utilizado.

#### 4.3.1 Moldes

Para llevar a cabo la construcción de probetas de PVA FRC se requieren de moldes que le den forma a la mezcla. Por ello, se utilizaron dos tipos: cilíndricos y prismáticos, cuyas dimensiones internas y material de procedencia se observan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Dimensiones de moldes utilizados.

Probeta	Largo (mm)	Altura (mm)	Diámetro/Ancho (mm)	Material
Cilíndrica	-	210	105	PVC
Prismática	530	150	150	Acero

En cuanto al moldaje cilíndrico, este fue fabricado por la autora del presente documento manteniendo la misma relación de esbeltez de 2:1 utilizada por A. Arenas y J. Revecó en sus respectivos trabajos. Por otro lado, el moldaje prismático fue facilitado por la división de hormigones de IDIEM – Arturo Prat, llegando a pesar 30kg cada uno (ver Figura 4.3).



Figura 4.3: Moldaje cilíndrico y prismático.

### 4.3.2 Preparación de Mezcla

Para preparar las mezclas descritas en la sección de dosificación se necesitan varios implementos, entre los cuales destacan: poruñas, pailas, varillas de acero, baldes contenedores, bidones para el agua, moldes de probetas vacíos, balanzas de diferente precisión y un mezclador de cemento (ver Figura 4.4).



**Figura 4.4: Implementos necesarios para preparar la mezcla.**

Notar que la diferencia que existe entre el volumen de un cilindro y una vigueta es bastante amplia, por lo que se optó por producir la mezcla equivalente a tres cilindros en un balde de pintura de 20 litros y la mezcla equivalente a dos viguetas en un contenedor de 50 litros.

Ahora bien, el procedimiento a seguir para la preparación de mezclas se detalla a continuación:

- En primera instancia, se pesa el cemento, gravilla, arena gruesa, arena fina y fibra de PVA necesarios para producir alguna de las mezclas indicadas anteriormente. Dentro de las pailas se vierte el contenido de los materiales, procurando primero homogeneizar solamente los áridos y luego los áridos con el cemento. Paralelamente, en los bidones se agrega la cantidad de agua y plastificante requeridos para cubrir el volumen de mezcla a preparar.
- Posteriormente, se humecta el contenedor correspondiente que albergará la mezcla para cilindros o viguetas, y se procede a incorporar la mitad de la mezcla homogeneizada junto a  $\frac{1}{4}$  de agua. De esta manera, se comienzan a revolver los materiales con el mezclador de cemento, agregando paulatinamente la otra mitad de material y los  $\frac{3}{4}$  de agua restantes.
- Una vez alcanzada una pasta homogénea, se añaden lentamente las fibras de PVA mientras el mezclador sigue en funcionamiento con el objetivo de que estas últimas queden bien distribuidas dentro de la mezcla.
- Es importante mencionar que se debe tener cuidado con las acumulaciones de material seco que se van formando en el borde o el fondo del contenedor, por lo que, de ser necesario, con una varilla de acero se tiene que ir soltando el material hasta alcanzar su unión con el resto de la mezcla.

Inmediatamente después de haber terminado la mezcla, se llenan los moldes correspondientes, previamente aceitados con desmoldante, hasta el primer tercio donde, primero se introduce una varilla de acero 25 veces formando una espiral y luego se golpea 25 veces la parte externa del molde con el objetivo de vibrar la mezcla. A continuación, se repiten los pasos antes mencionados para los 2/3 restantes del molde. En seguida, se enrasa la superficie expuesta para eliminar el material sobrante y se rotula el exterior del molde con el tipo de mezcla, el porcentaje de fibra y la fecha de elaboración de la probeta. Cabe destacar que, para el caso de los cilindros, se optó por cubrir la superficie expuesta con papel transparente para evitar la evaporación del agua y, para el caso de las viguetas, se prefirió mantener una hidratación diaria de la probeta hasta los 28 días.

Por último, una vez endurecida la mezcla de hormigón reforzado se inicia el proceso de desmoldaje para cada una de las probetas construidas. Para ello, se corta el molde de PVC cilíndrico con una sierra teniendo cuidado de no dañar la probeta o, se desatornillan las caras transversales del molde de acero prismático con la ayuda de un caimán. Es importante mencionar que, las probetas cilíndricas se mantuvieron en sus moldes hasta aproximadamente los 40 días, sin embargo, las viguetas fueron desmoldadas a los 7 días producto del número acotado de moldes prismáticos.

El resultado final de la construcción de probetas se puede observar en la Figura 4.5.



**Figura 4.5: Probetas cilíndricas y prismáticas de hormigón reforzado con fibras de PVA.**

### 4.3.3 Probetas

La especificación de la cantidad de probetas cilíndricas y prismáticas construidas, según mezcla y volumen de fibra, se pueden observar en las Tablas 4.7 y 4.8, respectivamente.

**Tabla 4.7: Cantidad de probetas cilíndricas.**

Volumen de Fibra	M1	M2	Total
0%	6	6	12
1.23%	6	6	12
2%	6	6	12
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>

**Tabla 4.8: Cantidad de probetas con forma de viguetas.**

Volumen de Fibra	M1	M2	Total
0%	2	2	4
1.23%	2	2	4
2%	2	2	4
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>12</b>

Se construyeron en total 48 probetas cilíndricas y prismáticas, de las cuales, se ensayarían solamente 12 cilindros a tracción directa, 12 cilindros a compresión y 12 viguetas a flexión, dejando 12 cilindros de reserva. Tal fue el caso, que algunas de las series de probetas cilíndricas fueron ensayadas por completo.

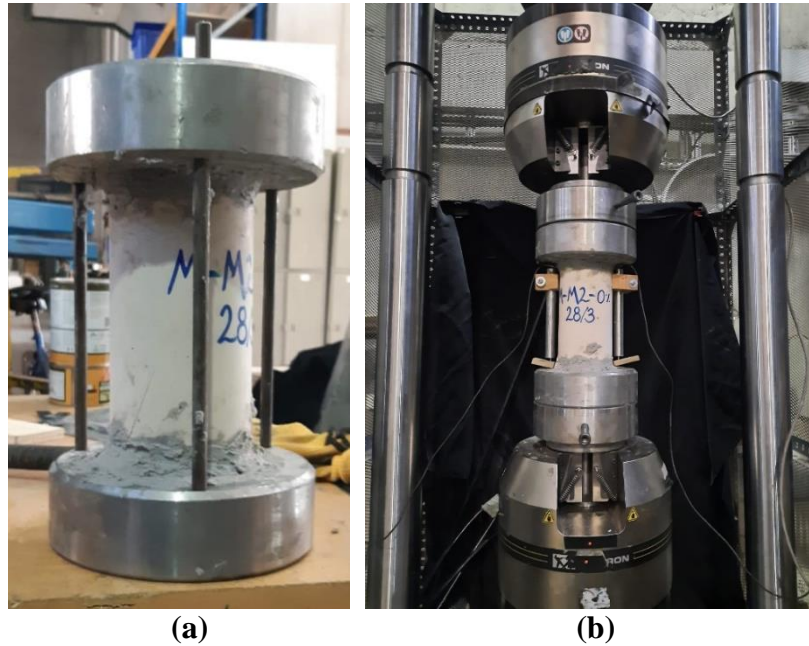
## 4.4 Descripción de Ensayos

En este apartado se entrega el detalle de la preparación de las probetas destinadas a ensayos de tracción directa, compresión y flexión, junto a sus respectivos montajes en la máquina universal Instron ® modelo 600LX, ubicada en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

### 4.4.1 Tracción Directa

El montaje del ensayo a tracción directa en la máquina universal fue diseñado por J. Reveco y se constituye, resumidamente, por dos placas metálicas circulares sostenidas por mordazas. La probeta destinada a ensayo de tracción requiere de una preparación importante debido a que se debe unir a las placas metálicas por medio de un adhesivo epóxico (Sikadur 31-HMG), tanto en su cara superior como en su cara inferior. Además, este ensayo requiere de una perfecta alineación entre ambas placas metálicas, razón por la cual tienen perforaciones que permiten pasar varillas de metal (ver Figura 4.6-a). Este proceso debe realizarse al menos 24 horas antes del ensayo para asegurar una correcta adhesión entre el metal y la probeta de hormigón.

El día del ensayo, se retiran las varillas de metal y se monta la probeta con las placas metálicas en la máquina universal para, posteriormente, fijar los sensores LVDT (de sus siglas en inglés “Linear Variable Displacement Transducers”) a las caras laterales de la probeta con ayuda de un pegamento instantáneo (Loctite) (ver Figura 4.6-b).

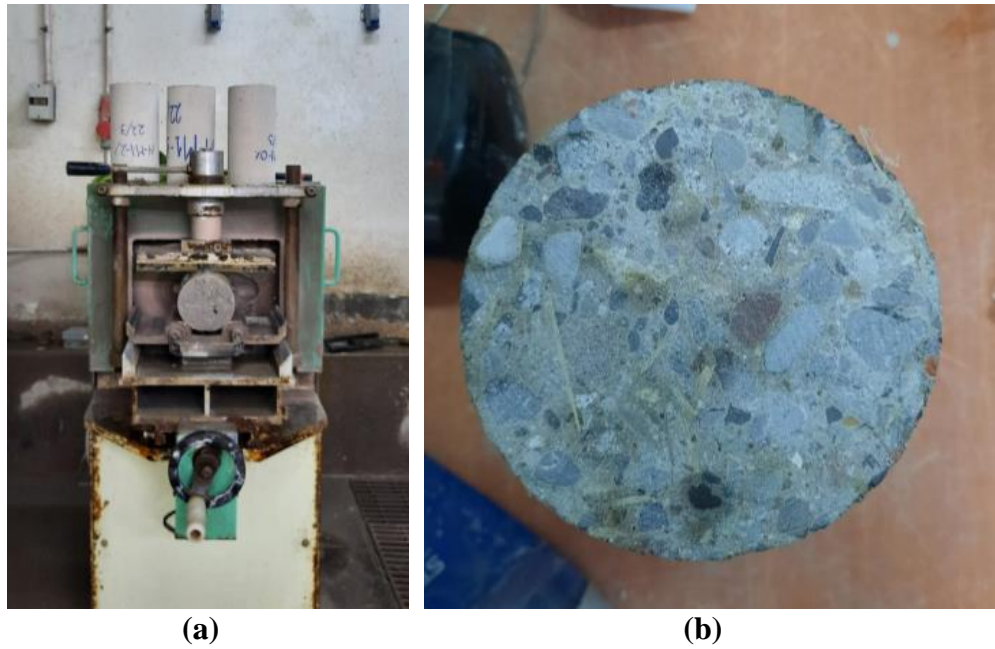


**Figura 4.6: Montaje de cilindros a tracción.**

#### **4.4.2 Compresión**

El montaje del ensayo a compresión en la máquina universal se constituye por dos placas metálicas de carga en la parte inferior y superior, siendo la primera fija y la segunda rotulada. Por lo anterior, la probeta a ensayar debe tener sus caras superior e inferior completamente paralelas y perpendiculares a su manto.

Se observó que ninguna de las probetas destinadas a ensayo de compresión cumplían los requerimientos, por lo que, se solicitó ayuda al Laboratorio de Hormigones de IDIEM – Ercilla para rectificar las probetas de compresión en su Máquina Rectificadora de Hormigón Automática (ver Figura 4.7-a), obteniendo como resultado cilindros perfectamente alineados (ver Figura 4.7-b).



**Figura 4.7: Rectificado de cilindros por IDIEM - Ercilla.**

Una vez rectificada la probeta, se fija dentro de dos anillos de metal por medio de tres pernos cada uno y se monta sobre la máquina universal de ensayos. Es importante mencionar que los anillos cumplen con el objetivo de sostener los sensores LVDT (ver Figura 4.8).



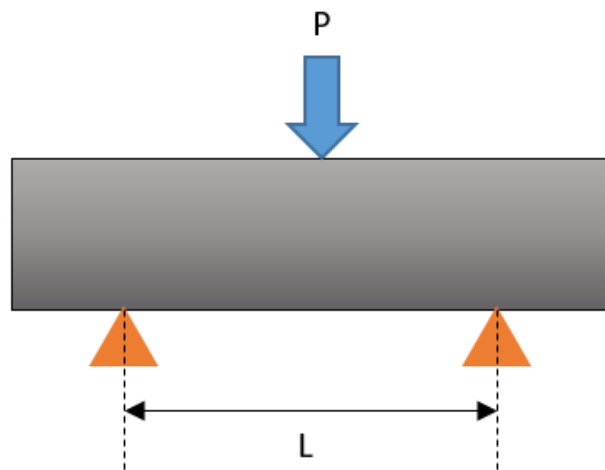
**Figura 4.8: Montaje de cilindros a compresión.**

### 4.4.3 Flexión

El montaje del ensayo a flexión en la máquina universal también fue diseñado por J. Reveco y se constituye, resumidamente, por dos placas metálicas rectangulares de gran tamaño ancladas a la máquina. La placa de mayor dimensión se ubica en la parte inferior y la de menor dimensión se ubica en la parte superior, observándose en ambas placas perforaciones a diferentes distancias con el objetivo de materializar diversas configuraciones de ensayos a flexión.

Ahora bien, el ensayo a flexión que se busca reproducir se presenta en el esquema de la Figura 4.9, donde se observa un ensayo a 3 puntos cuya distancia entre apoyos ( $L$ ) corresponde a 400 (mm), y posee una carga central  $P$  que será directamente registrada por la máquina.

Este último punto marca la diferencia entre el trabajo de A. Arenas y esta investigación debido a que, en primer lugar, el largo de viguetas utilizado es de 600 y 530 (mm), respectivamente y, en segundo lugar, los ensayos a flexión corresponden a 4 puntos (dos apoyos, dos cargas) y 3 puntos (dos apoyos, una carga), respectivamente.



**Figura 4.9:** Esquema del ensayo a flexión de viguetas.

Para el ensayo de flexión basta montar la vigueta directamente sobre los apoyos, teniendo cuidado con fijar los sensores LVDT al marco metálico de la máquina universal por medio de un imán. Esta posición permite que solo se deba adherir un pequeño soporte a ambos costados de la vigueta para marcar lecturas de deflexión (ver Figura 4.10).



**Figura 4.10: Montaje de viguetas a flexión.**

#### **4.4.4 Registro de Probetas Fabricadas**

En este apartado, específicamente en las Tablas 4.9 y 4.10, se entrega un registro de las probetas cilíndricas y prismáticas construidas, detallando su fecha de fabricación, ensayo realizado, días de fraguado y nomenclatura dada, la cual consiste en: mencionar la mezcla a la que pertenece (M1-M2), porcentaje de fibra que contiene (0-123-2) y el número correspondiente a la serie (V1-V6).

Recordar que, en un comienzo de las 6 probetas cilíndricas que conformar una serie de la misma mezcla y porcentaje de fibra, 2 estaban destinadas a ensayo de tracción directa, 2 a ensayo de compresión y 2 de reserva. No obstante, la realidad fue otra y las probetas de reserva debieron ensayarse según lo indicado en la Tabla 4.9.



**Tabla 4.9: Nomenclatura de probetas cilíndricas fabricadas.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Fecha Fabricación</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Días de Fraguado</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Fecha Fabricación</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Días de Fraguado</b>
M1-0-V1	22-mar	T	51	M2-0-V1	28-mar	T	45
M1-0-V2	22-mar	T	51	M2-0-V2	28-mar	T	45
M1-0-V3	22-mar	T	55	M2-0-V3	28-mar	T	51
M1-0-V4	23-mar	T	136	M2-0-V4	28-mar	C	108
M1-0-V5	23-mar	C	85	M2-0-V5	28-mar	C	108
M1-0-V6	23-mar	C	85	M2-0-V6	28-mar	R	-
M1-123-V1	22-mar	T	55	M2-123-V1	30-mar	T	49
M1-123-V2	22-mar	T	55	M2-123-V2	30-mar	T	61
M1-123-V3	22-mar	T	57	M2-123-V3	30-mar	T	51
M1-123-V4	23-mar	C	86	M2-123-V4	30-mar	T	131
M1-123-V5	22-mar	C	85	M2-123-V5	30-mar	C	106
M1-123-V6	23-mar	R	-	M2-123-V6	30-mar	C	106
M1-2-V1	22-mar	T	55	M2-2-V1	30-mar	T	49
M1-2-V2	22-mar	T	55	M2-2-V2	30-mar	T	49
M1-2-V3	22-mar	C	92	M2-2-V3	30-mar	T	131
M1-2-V4	23-mar	C	92	M2-2-V4	30-mar	C	85
M1-2-V5	22-mar	R	-	M2-2-V5	30-mar	C	85
M1-2-V6	23-mar	R	-	M2-2-V6	30-mar	R	-

C: Compresión.

T: Tracción.

R: Reserva.

**Tabla 4.10: Nomenclatura de viguetas fabricadas.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Fecha Elaboración</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Días de Fraguado</b>
M1-0-V1	06-may	FLEXION	108
M1-0-V2	05-may	FLEXION	109
M1-123-V1	09-may	FLEXION	105
M1-123-V2	09-may	FLEXION	105
M1-2-V1	06-may	FLEXION	105
M1-2-V2	06-may	FLEXION	108
M2-0-V1	09-may	FLEXION	102
M2-0-V2	09-may	FLEXION	105
M2-123-V1	09-may	FLEXION	105
M2-123-V2	09-may	FLEXION	106
M2-2-V1	09-may	FLEXION	105
M2-2-V2	09-may	FLEXION	106

## 5 Análisis y Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de los ensayos a tracción directa, compresión y flexión, detallando cada uno de los inconvenientes que surgieron en el proceso y sus respectivas soluciones. Adicionalmente, se realiza un análisis cuantitativo y cualitativo de las características relevantes visualizadas en los resultados.

### 5.1 Ensayos a tracción directa

La configuración a tracción de la máquina universal, detallada en el capítulo anterior, consideró una velocidad de ensayo de 0.5 mm/min y el término del mismo en el momento que la carga alcanza el 80% de degradación respecto al peak máximo. Estas variables son las mismas utilizadas por A. Arenas y J. Revecó en sus respectivos trabajos.

Asimismo, la recolección de datos se realizó mediante sensores LVDT, ubicados en sectores contrapuestos de la probeta, y la máquina universal. Ambos cumplen el objetivo de registrar milimétricamente el alargamiento de la probeta en función de la carga aplicada. No obstante, los primeros son destinados a medir la etapa elástica del ensayo, mientras que, la máquina apunta la etapa plástica del mismo. Para la lectura de los datos, se combinaron ambas curvas haciéndolas coincidir en el peak de tensiones y se extrajeron las tensiones máximas, deformaciones en el peak, deformaciones últimas y módulos de elasticidad, correspondientes a cada probeta ensayada. Estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 5.1. Cabe destacar que la calibración de los sensores es fundamental para el procesamiento de datos, por lo que, se realizó una calibración para ambos sensores, cuyo detalle se encuentra en el Anexo B.

Notar que, al día de los ensayos a tracción, cada una de las probetas procesadas presentó un tiempo de fraguado igual o superior a los 45 días (ver Tabla 4.9), y mantuvieron sus fallas respectivas dentro del tercio central del cilindro (ver Figura 5.1) tal y como se esperaba (aquellas que fallaron fuera del tercio central fueron automáticamente descartadas del estudio).

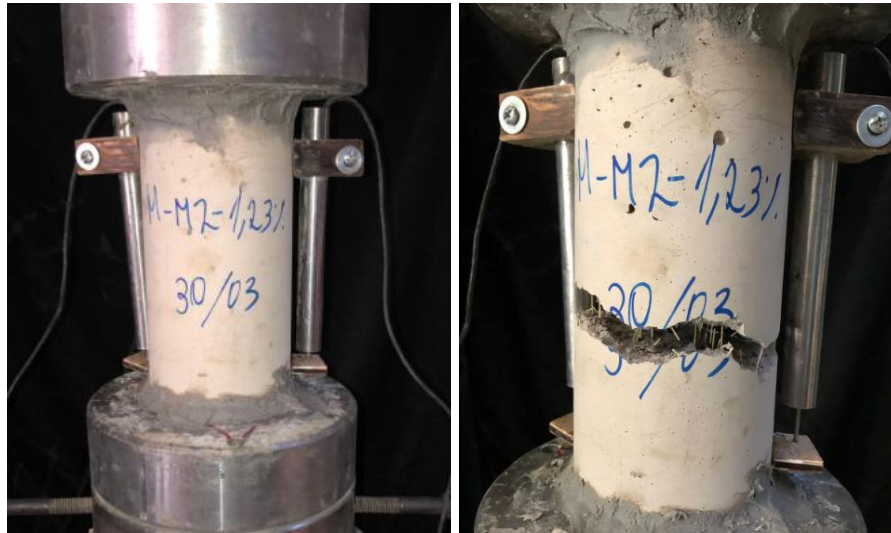


Figura 5.1: Modo de falla en probetas ensayadas a tracción directa.

Tabla 5.1: Resultados de ensayos a tracción directa.

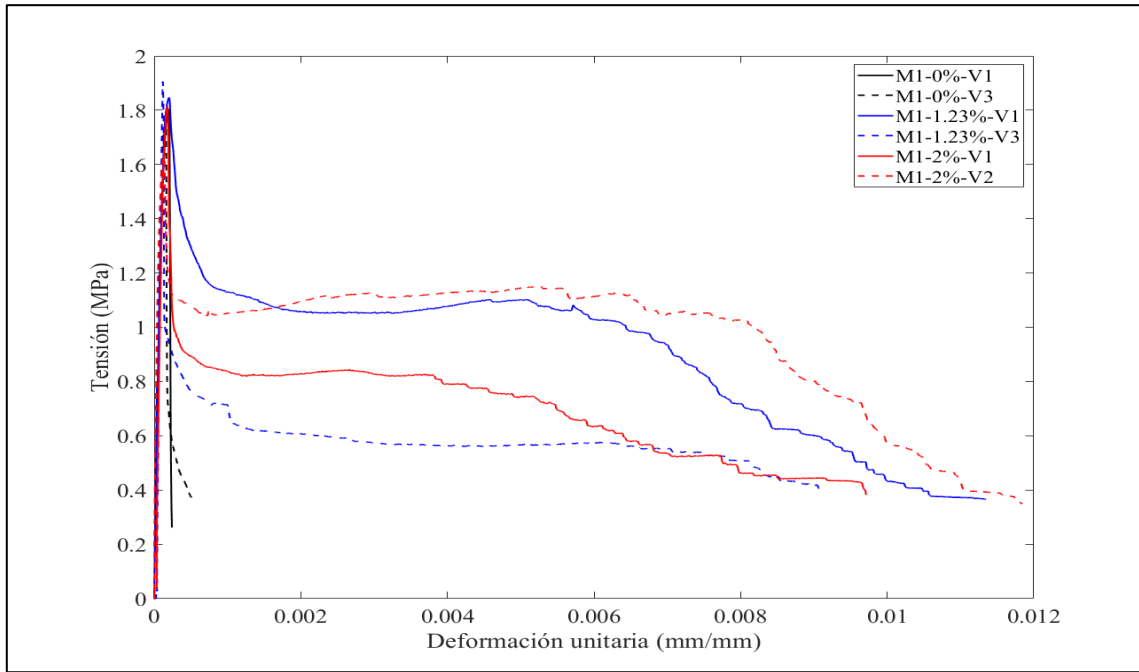
Mezcla	Probeta	$f'_t$ (MPa)	$\epsilon_{cr}$ (mm/mm)	$\epsilon_{ult}$ (mm/mm)	$E_c$ (MPa)	Energía Post-Fisuración hasta el 80% de degradación (J)
M1	M1-0-V1	1.80	0.00020	0.00024	17017	0.07
	M1-0-V3	1.75	0.00016	0.00052	21064	0.35
	M1-123-V1	1.85	0.00020	0.01134	21006	18.03
	M1-123-V3	1.91	0.00012	0.00907	12044	9.46
	M1-2-V1	1.81	0.00018	0.00971	12062	11.95
	M1-2-V2	1.65	0.00013	0.01183	25717	20.21
M2	M2-0-V1	1.78	0.00012	0.00017	20427	0.07
	M2-0-V3	1.74	0.00019	0.00023	18061	0.06
	M2-123-V2	2.34	0.00014	0.00019	18822	0.07
	M2-123-V4	1.92	0.00021	0.00151	10967	1.42
	M2-2-V1	1.70	0.00024	0.01548	7867	21.47
	M2-2-V2	2.16	0.00021	0.01241	12493	15.36

$f'_t$ : Tensión máxima a tracción.

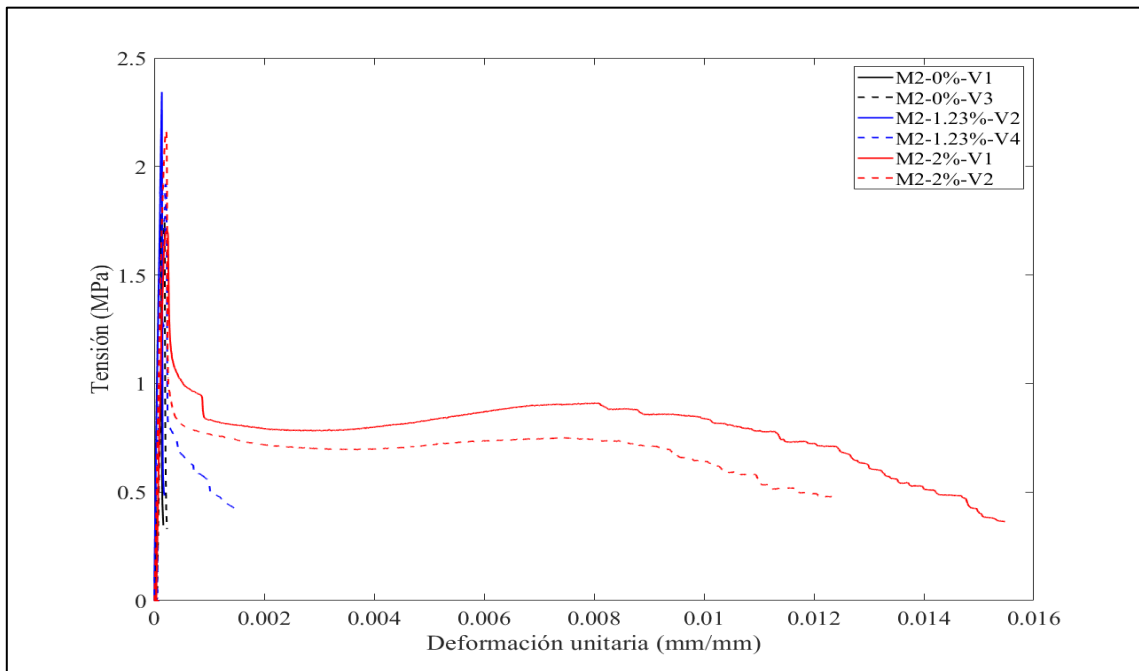
$\epsilon_{cr}$ : Deformación en el peak máximo de tensión.

$\epsilon_{ult}$ : Deformación alcanzada al 80% de degradación de tensión máxima.

$E_c$ : Módulo de Elasticidad.



**Figura 5.2: Curvas de ensayos a tracción directa para mezclas de árido grueso M1.**



**Figura 5.3: Curvas de ensayos a tracción directa para mezclas de árido fino M2.**

En relación a la tensión máxima de tracción, se puede mencionar que ésta se ve alterada, en mayor o menor medida, por el tipo de mezcla y la presencia de fibras. Para el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.2, en promedio, se aprecia un aumento de 5.9% de tensión máxima para un volumen de fibra de 1.23%, y una disminución de 2.5% de tensión máxima para un volumen de fibra de 2%, con respecto a las muestras sin fibra. De este modo, inmediatamente se revela la existencia de un porcentaje óptimo de fibras que maximiza la tensión peak a tracción en mezclas de árido grueso con fibras de PVA de 30mm. En contraste, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) de la Figura 5.3, en promedio se observan aumentos de tensión máxima para ambos volúmenes de fibra. Sin embargo, el mayor incremento se registra para un volumen de fibra de 1.23% por sobre el volumen de fibra de 2%, aumentando un 21% y 9.77% en comparación con sus pares sin fibra, respectivamente.

Con respecto a la ductilidad, para el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.2, se observa un comportamiento dúctil similar en las muestras con contenido de fibra de 1.23% y 2%, a causa de que ambas alcanzan deformaciones últimas que en promedio difieren en un 5.2%. Estas deformaciones, son 2578% y 2726% mayores a las deformaciones últimas registradas para la misma mezcla sin contenido de fibra, respectivamente. Por otro lado, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) de la Figura 5.3, se evidencia un comportamiento frágil para los contenidos de fibra de 0% y 1.23%, siendo dúctil la respuesta del volumen de 2% de fibra. Lo anterior no refleja necesariamente el real comportamiento del contenido de 1.23% de fibra producto de que, de 4 ensayos realizados: los dos primeros fueron fallas frágiles, el tercero fue falla dúctil y el último fue falla frágil con tendencia a ser dúctil (todos con fallas dentro del tercio central)). En última instancia, se prefirió presentar la falla más recurrente en esta investigación. Ahora bien, en promedio, las deformaciones últimas alcanzadas por las muestras con contenidos de fibra de 1.23% y 2% corresponden a 325% y 6885% mayores a las registradas por la misma mezcla sin contenido de fibra.

Para ambas mezclas se observaron respuestas de endurecimiento por deslizamiento del tipo hormigón reforzado convencional. Finalmente, luego de ensayar 19 probetas a tracción directa se observa una distribución uniforme de fibras en la mezcla (ver Figura 5.4).



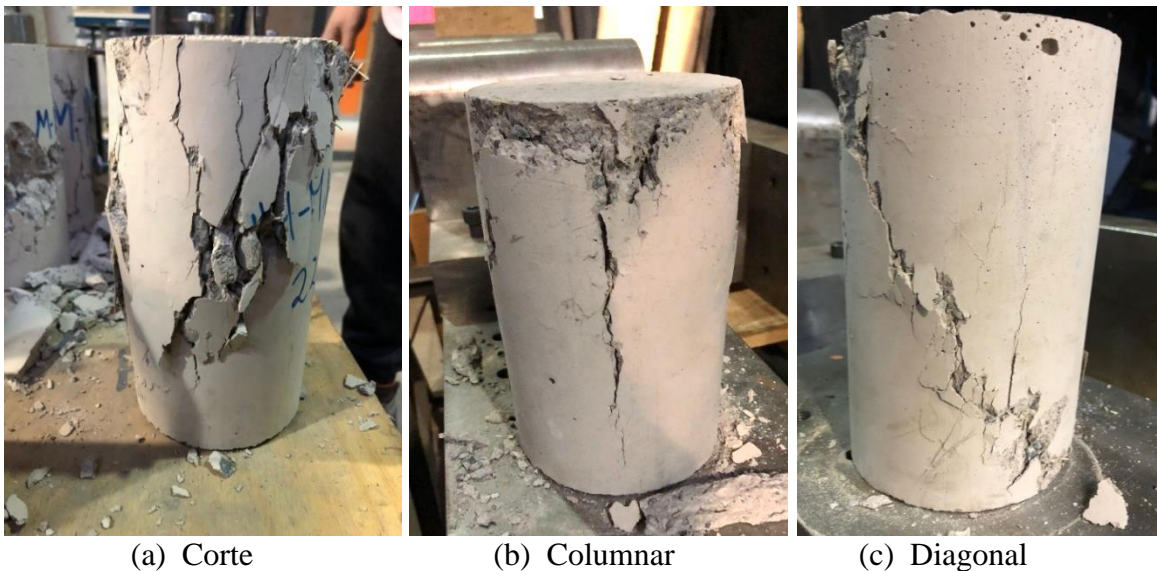
**Figura 5.4: Distribución de fibras**

## 5.2 Ensayos a compresión

Por su parte, la configuración a compresión de la máquina universal, detallada anteriormente, consideró una velocidad de ensayo de 0.3 mm/min y el término del mismo en el momento que la carga alcanza el 20% de su peak máximo. La primera variable se aparta de los trabajos de A. Arenas y J. Reveco, que optaron por una velocidad de 0.5 mm/min. La decisión se tomó para resguardar la seguridad de las personas y evitar posibles explosiones abruptas del concreto.

Asimismo, la recolección de datos se realizó mediante sensores LVDT, ubicados esta vez en los anillos de soporte, y la máquina universal. Ambos cumplen el objetivo de registrar el “acortamiento” milimétrico de la probeta en función de la carga aplicada. No obstante, los primeros están destinados a medir la etapa elástica del ensayo, mientras que, la máquina apunta la etapa plástica del mismo. Para la lectura de los datos, se combinaron ambas curvas haciéndolas coincidir en el peak de tensiones y se extrajeron las tensiones máximas, deformaciones en el peak, deformaciones últimas y módulos de elasticidad, correspondientes a cada probeta ensayada. Estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 5.2.

Notar que, al día de los ensayos a compresión, cada una de las probetas presentó un tiempo de fraguado igual o superior a los 85 días (ver Tabla 4.9), y mantuvieron tres modos de falla: de corte, columnar y/o diagonal, donde se aprecia una fisura diagonal que comienza en la cara superior y termina en la cara inferior (ver Figura 5.5). Luego, las fallas coinciden con las esperadas.



**Figura 5.5: Modos de falla en probetas ensayadas a compresión.**

**Tabla 5.2: Resultados de ensayos a compresión.**

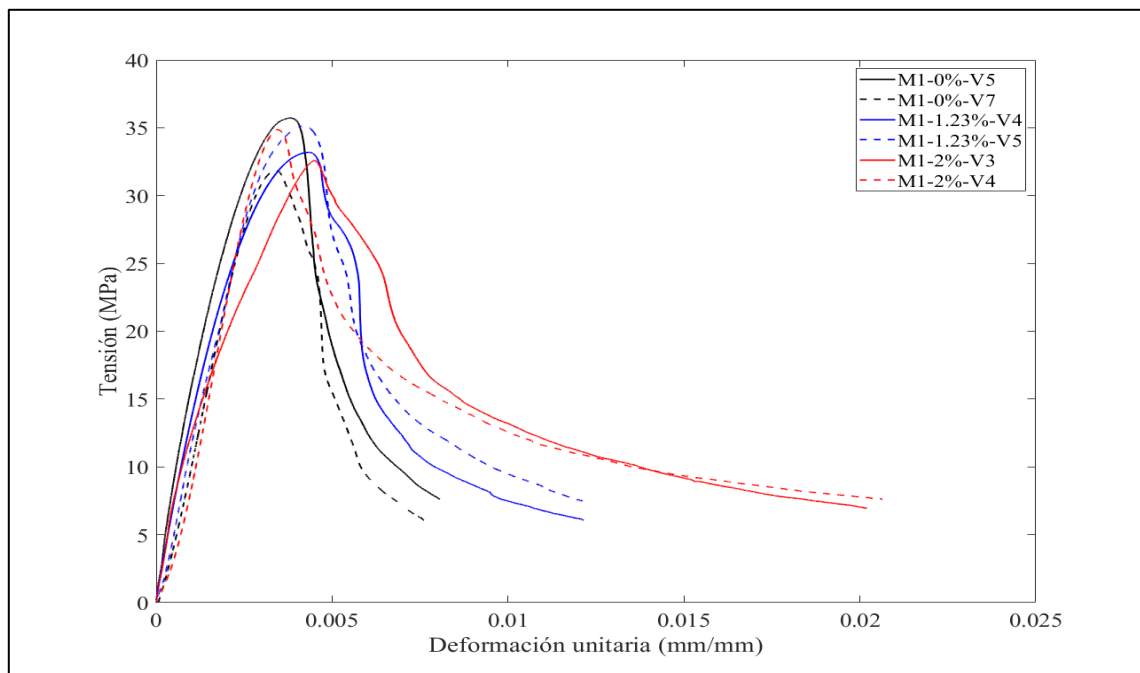
Mezcla	Probeta	$f'_c$ (MPa)	$\epsilon_{cr}$ (mm/mm)	$\epsilon_{ult}$ (mm/mm)	$E_c$ (MPa)	Energía Post-Fisuración hasta el 65% de degradación (J)
M1	M1-0-V5	35.72	0.0038	0.0060	15929	90.24
	M1-0-V7	31.83	0.0034	0.0057	12311	98.82
	M1-123-V4	33.18	0.0043	0.0072	13656	126.54
	M1-123-V5	35.12	0.0042	0.0080	11563	153.45
	M1-2-V3	32.59	0.0045	0.0117	11463	252.90
	M1-2-V4	34.87	0.0034	0.0104	10119	245.87
M2	M2-0-V4	28.26	0.0046	0.0054	12617	52.29
	M2-0-V5	28.11	0.0052	0.0064	10622	34.51
	M2-123-V5	29.10	0.0041	0.0045	12186	31.54
	M2-123-V6	28.19	0.0042	0.0100	11938	172.26
	M2-2-V4	32.14	0.0074	0.0096	13547	96.66
	M2-2-V5	32.01	0.0064	0.0097	11064	143.48

$f'_c$ : Tensión máxima a compresión.

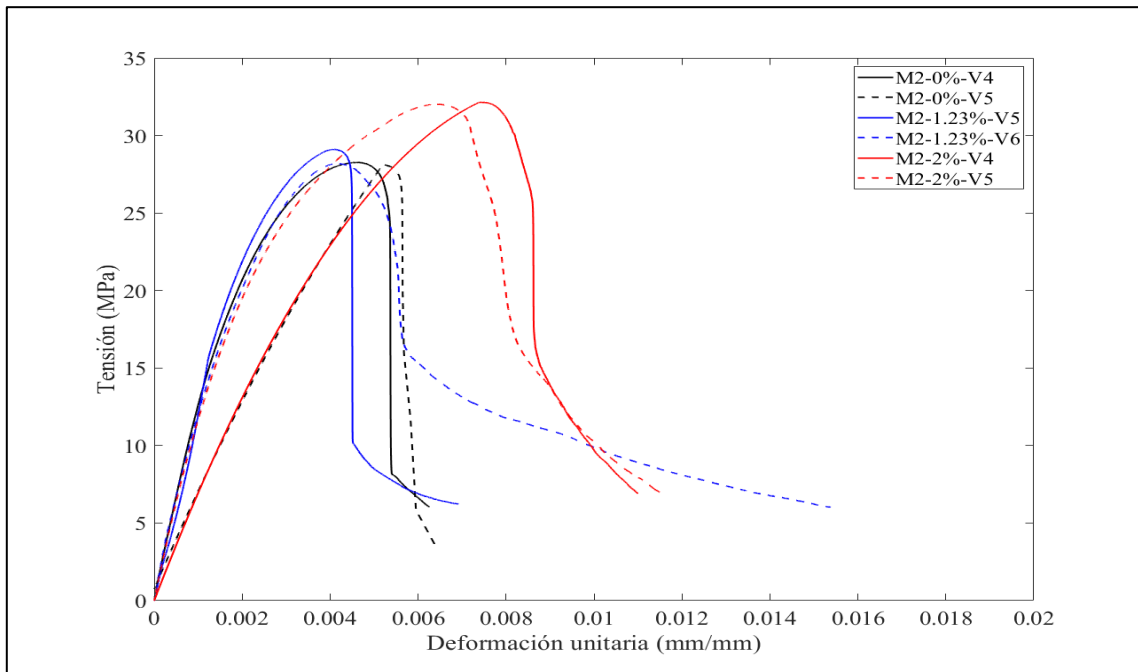
$\epsilon_{cr}$ : Deformación en el peak de tensión máxima a compresión.

$\epsilon_{ult}$ : Deformación alcanzada al 65% de degradación de la tensión máxima.

$E_c$ : Módulo de Elasticidad.



**Figura 5.6: Curvas de ensayos a compresión para mezclas de árido grueso M1.**



**Figura 5.7: Curvas de ensayos a compresión para mezclas de árido fino M2.**

En cuanto a la tensión máxima de compresión, se puede mencionar que ésta se ve alterada levemente por la presencia de fibras en ambas dosificaciones. Para el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.6, en promedio, se aprecia un aumento de 1.1% de tensión máxima para un volumen de fibra de 1.23%, y una disminución de 0.1% de tensión máxima para un volumen de fibra de 2%, con respecto a las muestras sin fibra. De esta manera, se podría encaminar a la teoría de un porcentaje óptimo de fibras. En contraparte, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) de la Figura 5.7, en promedio, se observa un aumento de 1.63% de tensión máxima en presencia de un volumen de fibra de 1.23% de fibra, y un incremento de 13.8% de tensión máxima en presencia de un volumen de fibra de 2%, en comparación a la muestra sin fibra.

Acerca de la ductilidad, se destaca que en el ensayo de compresión presenta una tendencia a aumentar con el incremento del contenido de fibras. En el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.6, los volúmenes de fibra de 1.23% y 2%, presentan deformaciones últimas 30% y 89% mayores a las deformaciones registradas para la misma mezcla sin contenido de fibra. Por otro lado, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) de la Figura 5.7, las deformaciones últimas de los volúmenes de fibra de 1.23% y 2% reflejaron ser 23% y 63% mayores a las registradas por la misma mezcla sin contenido de fibra.

Lo anterior se condice con la literatura, debido a que, en presencia de fibras la resistencia tiende a aumentar y la pendiente de caída en la etapa plástica a disminuir provocando mayores ductilidades.



### 5.3 Ensayos a flexión

La configuración a flexión de la maquina universal, antes detallada, consideró una velocidad de ensayo de 0.3 mm/min y el término del mismo en el momento que la carga alcanza el 20% de su peak máximo. Nuevamente, la primera variable se aparta del trabajo de A. Arenas, que optó por una velocidad de 0.5 mm/min. La decisión se tomó por la misma razón que para los ensayos a compresión: resguardar la seguridad de las personas y evitar posibles explosiones o desprendimientos abruptos del concreto.

Asimismo, la recolección de datos se realizó mediante sensores LVDT, ubicados justo en la línea de aplicación de carga, y la máquina universal. Ambos cumplen el objetivo de registrar la deflexión alcanzada por la viga en función de la carga aplicada. No obstante, los primeros están destinados a medir la etapa elástica del ensayo, mientras que, la máquina apunta la etapa plástica del mismo. Para la lectura de los datos, se combinaron ambas curvas haciéndolas coincidir en el peak de tensiones y se extrajeron las tensiones máximas, deflexiones en el peak, deflexiones últimas y módulos de elasticidad, correspondientes a cada probeta ensayada. Estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 5.3.

Notar que, al día de los ensayos a flexión, cada una de las probetas presentó un tiempo de fraguado igual o superior a los 102 días (ver Tabla 4.10), y mantuvieron un modo de falla por flexión pura, sin presentar fallas por corte (ver Figura 5.8).



**Figura 5.8: Modo de falla en probetas ensayadas a flexión.**

**Tabla 5.3: Resultados de ensayos de flexión.**

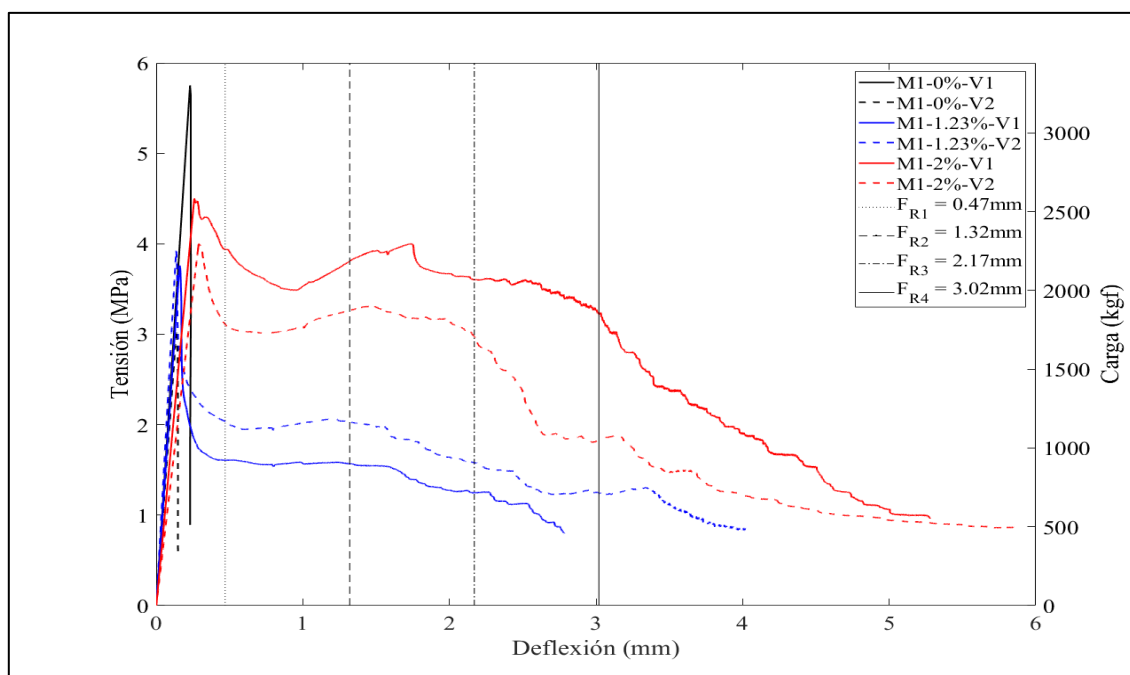
Mezcla	Probeta	$f'_r$ (MPa)	$\delta_{cr}$ (mm)	$\delta_{ult}$ (mm)	Energía Post-Fisuración hasta los 3.02mm (J)
M1	M1-0-V1*	5.75	0.230	0.258	1.34
	M1-0-V2	3.05	0.139	0.151	1.01
	M1-123-V1	3.76	0.160	2.786	85.28
	M1-123-V2	3.92	0.136	4.029	116.23
	M1-2-V1	4.50	0.259	5.282	229.28
	M1-2-V2	4.00	0.290	5.860	176.70
M2	M2-0-V1	2.84	0.253	0.266	0.91
	M2-0-V2	2.32	0.181	0.194	0.77
	M2-123-V1*	1.88	0.392	6.709	100.30
	M2-123-V2	3.18	0.198	5.304	115.55
	M2-2-V1	3.73	0.196	6.492	128.72
	M2-2-V2	4.20	0.248	6.724	225.75

\* Probetas descartadas

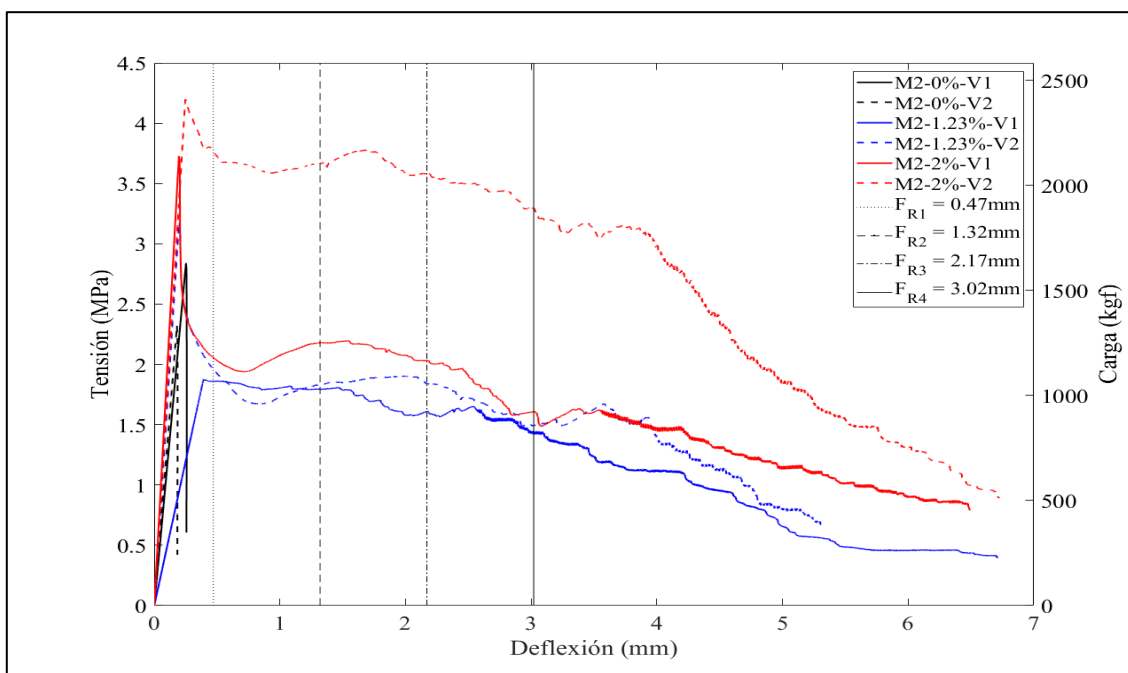
$f'_r$ : Tensión de rotura a flexión.

$\delta_{cr}$ : Deflexión en el peak máximo de tensión de rotura.

$\delta_{ult}$ : Deflexión alcanzada al 80% de degradación de la tensión máxima.



**Figura 5.9: Curvas de ensayos a flexión para mezclas de árido grueso M1.**



**Figura 5.10: Curvas de ensayos a flexión para mezclas de árido fino M2.**

En relación a la tensión máxima de flexión, para el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.9, no se realizarán comparaciones o análisis con el promedio de las tensiones de las muestras sin fibra a causa de la variación de más del 88% que existe entre ambas probetas (se omite la probeta M1-0-V1). Entonces, en función del punto anterior, se evidencia un aumento del 25.9% de tensión máxima para un volumen de fibra de 1.23%, y un aumento del 39.3% de tensión máxima para un volumen de fibra de 2%, con respecto a la muestra sin fibra. Revelándose de esta manera, un aumento sostenido en las tensiones peak producto del aumento del contenido de fibras. Tal y como ocurrió en M1 con el arreglo de medias, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) también se omitirá una probeta (M2-123-V1) producto de que, lamentablemente, ya se encontraba fisurada al momento de realizar el ensayo. Este impase debe haber ocurrido durante el desmoldaje o traslado de la probeta. Aclarado lo anterior, en la Figura 5.10 se distingue un aumento de la tensión máxima a flexión según el aumento del volumen de fibra. Particularmente, la tensión máxima a flexión aumentó un 23.3% en presencia de un volumen de 1.23% de fibra, y aumentó un 53.7% en presencia de un volumen de 2% de fibra, en comparación con sus pares sin fibra.

Con respecto a la ductilidad, se evidencia que este comportamiento aumenta en forma progresiva para todas las muestras con contenido de fibra. En el caso de la mezcla con árido grueso (M1) de la Figura 5.9, en las muestras con contenido de fibra de 1.23% y 2%, se aprecian deflexiones últimas de 1222% y 2061% mayores a las deformaciones últimas registradas para la misma mezcla sin contenido de fibra. Por otro lado, para el caso de la mezcla con árido fino (M2) de la Figura 5.10, se observa que las deflexiones últimas alcanzadas por las muestras con contenidos de fibra de 1.23% y 2% corresponden a 2205% y 2771% mayores a las registradas por la misma mezcla sin contenido de fibra. Ahora bien, vale la pena destacar que la probeta M2-2-V2 exhibe una respuesta más tenaz que cualquiera de las otras muestras de M2.

Lo anterior se alinea en menor medida con la literatura, ya que, esta menciona que los aumentos de resistencia son leves y que las deformaciones últimas son similares independiente de los volúmenes de fibra utilizados. Sin embargo, la experiencia revela que los aumentos de resistencia son algo más que leves (en promedio 35.5% mayores) y las deflexiones últimas difieren entre sí un 44% en presencia de fibras, por lo que, no podrían catalogarse como cercanas.

Adicionalmente, la norma europea EN 14651[10] define deflexiones típicas con el objetivo de medir tensiones residuales en los siguientes puntos:  $\delta=0.47\text{mm}$ ,  $\delta=1.32\text{mm}$ ,  $\delta=2.17\text{mm}$  y  $\delta=3.02\text{mm}$ . Estas deflexiones están relacionadas con los valores típicos de apertura de grieta o “CMOD” por sus siglas en inglés “*Crack Mouth Opening Displacement*” correspondientes a: CMOD=0.5mm, CMOD=1.5mm, CMOD=2.5mm y CMOD=3.5mm. En la Tabla 5.4 se pueden observar las tensiones residuales alcanzadas por las probetas estudiadas a deflexión con su respectivo límite de proporcionalidad ( $f_{LOP}$ ).

**Tabla 5.4: Tensiones residuales promedio para ensayos a flexión.**

Mezcla	Probeta	$f_{LOP}$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa) $\delta = 0.47\text{mm}$	$f_{R2}$ (MPa) $\delta = 1.32\text{mm}$	$f_{R3}$ (MPa) $\delta = 2.17\text{mm}$	$f_{R4}$ (MPa) $\delta = 3.02\text{mm}$
M1	M1-0-V1*	5.75	-	-	-	-
	M1-0-V2	3.05	-	-	-	-
	M1-123-V1	3.76	1.61	1.57	1.25	0.00
	M1-123-V2	3.92	2.04	2.03	1.58	1.24
	M1-2-V1	4.50	3.94	3.81	3.60	3.22
	M1-2-V2	4.00	3.11	3.27	2.97	1.83
M2	M2-0-V1	2.84	-	-	-	-
	M2-0-V2	2.32	-	-	-	-
	M2-123-V1*	1.88	1.86	1.79	1.61	1.44
	M2-123-V2	3.18	1.96	1.83	1.84	1.49
	M2-2-V1	3.73	2.06	2.18	2.03	1.61
	M2-2-V2	4.20	3.77	3.67	3.58	3.29

\* Probetas descartadas

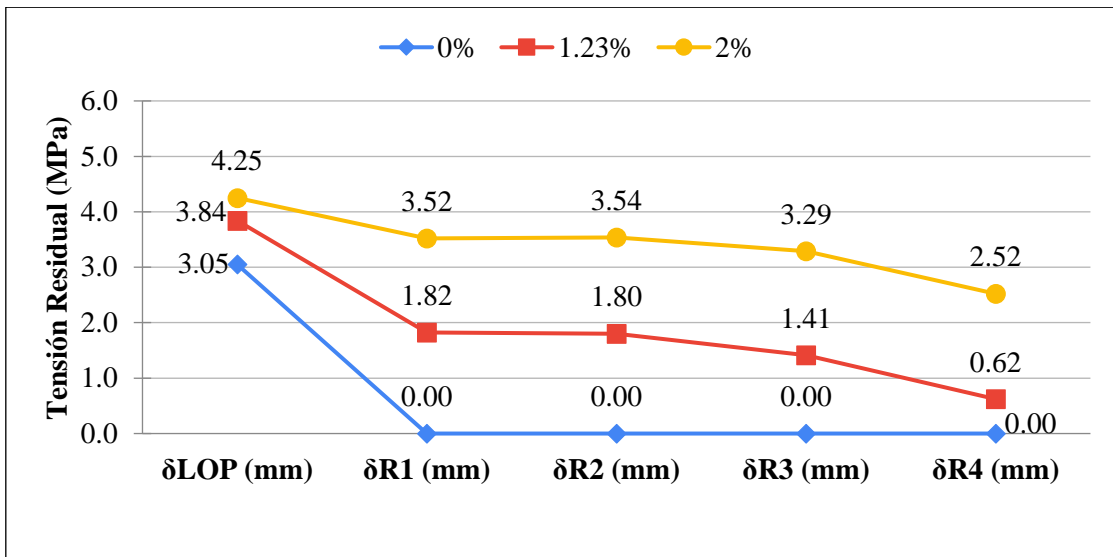


Figura 5.11: Tensiones residuales para mezclas de árido grueso M1.

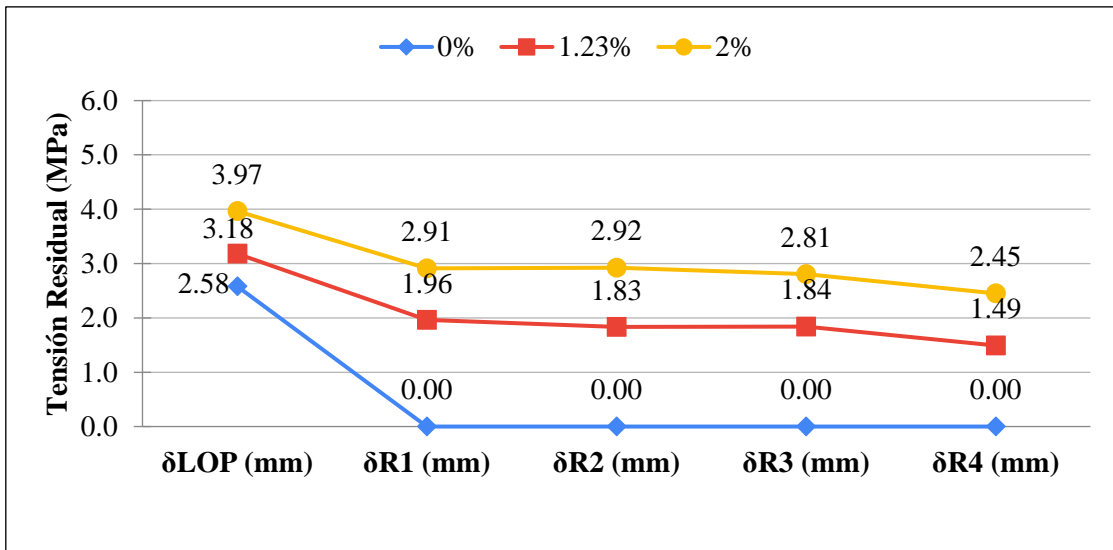


Figura 5.12: Tensiones residuales para mezclas de árido fino M2.

A partir de las Figuras 5.11 y 5.12, se puede observar un descenso paulatino de las tensiones residuales para las mezclas de áridos gruesos y finos, alcanzando siempre mayores tensiones con 2% de volumen de fibra en comparación con 1.23% de volumen. Por su parte, los límites de proporcionalidad aumentan con el aumento del volumen de fibra, al igual que la energía alcanzada hasta la deflexión establecida.

Durante el ensayo a flexión, surgió el fenómeno denominado “efecto puente” (ver Figura 5.13), el cual se produce posterior a la fisuración justo cuando las fibras comienzan a tomar carga e intentan mantener unida la matriz de hormigón.



**Figura 5.13: Efecto puente en probetas ensayadas a flexión.**

Notar que las deflexiones obtenidas son considerablemente mayores a las esperadas según la teoría, razón por la cual, se evalúa la existencia de un asentamiento no considerado ni determinado en la probeta. Aun así, los análisis son consistentes entre sí, por lo que, es válido realizar comparaciones.

## 5.4 Comparación entre Ensayos

### 5.4.1 Tensiones Máximas

En base a lo mencionado anteriormente, se realiza un resumen de las tensiones máximas promedio alcanzadas por las probetas ensayadas (ver Tabla 5.5).

**Tabla 5.5: Cuadro resumen de tensiones máximas de los ensayos.**

Mezcla	% Fibra	$f'_c$ (Mpa)	$f'_t$ (Mpa)	$f'_r$ (MPa)
M1	0%	33.78	1.78	3.05
	1.23%	34.15	1.88	3.84
	2%	33.73	1.73	4.25
M2	0%	28.19	1.76	2.58
	1.23%	28.65	2.13	3.18
	2%	32.07	1.93	3.97

En las Figuras 5.14 y 5.15 se muestran las variaciones porcentuales promedio de las resistencias máximas alcanzadas en los ensayos realizados a las probetas de hormigón reforzado con fibras, con respecto a su par sin fibra. Ahora bien, para la mezcla de árido grueso M1 de la Figura 5.14 se observa que, en los ensayos a compresión, tracción directa y flexión, la resistencia máxima aumenta un 1.1%, 5.9% y 25.9% para el volumen de 1.23% de fibra, respectivamente, siendo un caso particular el registrado para un 2% de fibra, ya que, para los ensayos de tracción directa y compresión, la resistencia máxima disminuyó un 2.5% y 0.1%, respectivamente, y aumentó un 39.2% para el ensayo a flexión. Por otro lado, para la mezcla de árido fino M2 de la Figura 5.15, se aprecia un aumento en la resistencia máxima para todos los ensayos en ambos volúmenes de fibra. En particular, para los ensayos a compresión, tracción directa y flexión se observa un aumento de 1.6%, 21% y 23.3% de resistencia máxima para un volumen de fibra de 1.23%, respectivamente, y se registra un aumento un 13.8%, 9.8% y 53.7% para un volumen de fibra de 2%, respectivamente.

De esta manera, se deduce que las tensiones máximas a compresión y tracción directa de M1 en la Figura 5.14 tienden a ser más homogéneas entre sí, en comparación con las tensiones máximas de M2 para los mismos ensayos que se muestran en la Figura 5.15. En cuanto a las tensiones máximas a flexión, en ambas mezclas se observan grandes variaciones ascendentes según el aumento del volumen de fibra utilizado. Notar que para el caso particular del ensayo a tracción directa para la mezcla M2, la tensión máxima alcanzada por un volumen de 1.23% de fibra es mayor al presentado por el volumen de 2% de fibra.

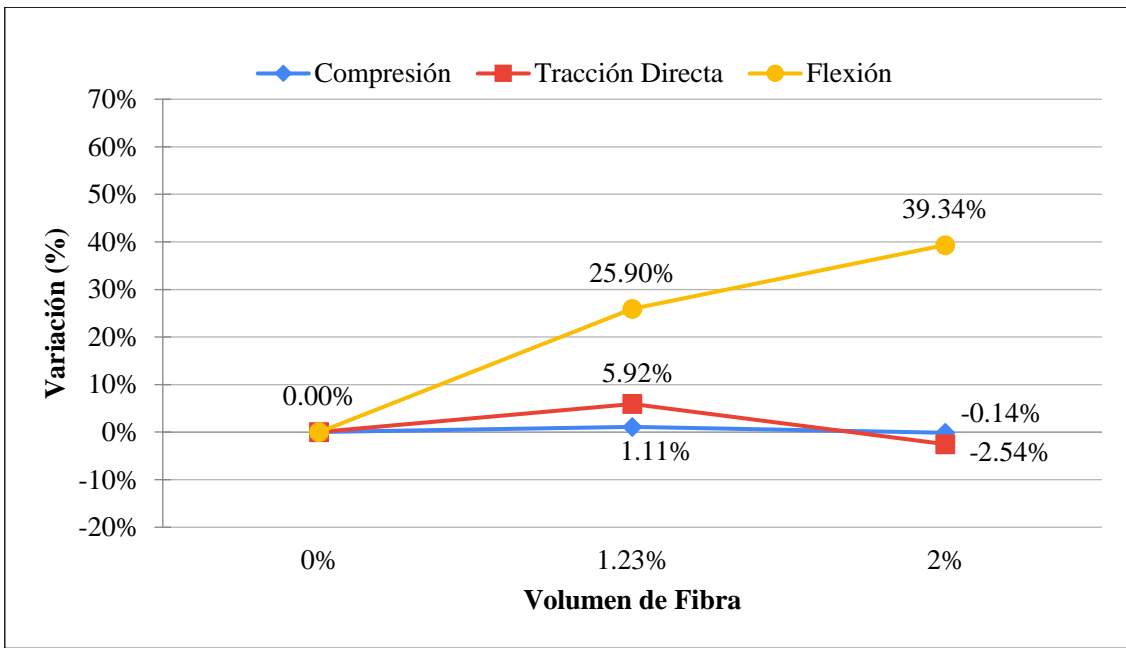


Figura 5.14: Variaciones porcentuales de tensiones máximas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M1.

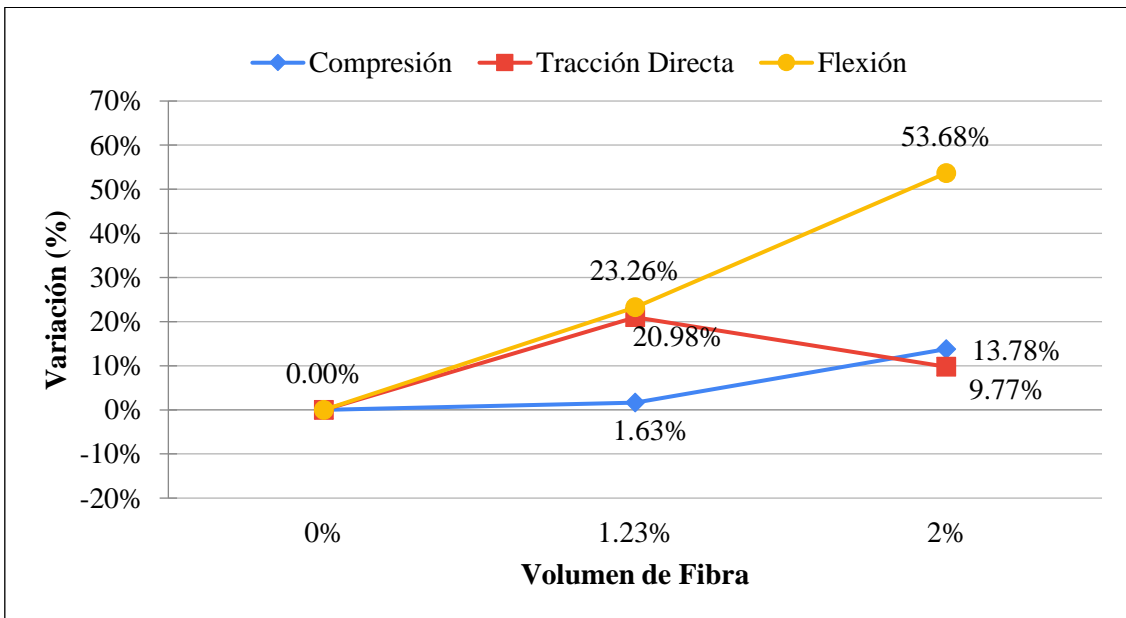


Figura 5.15: Variaciones porcentuales de tensiones máximas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M2.



## 5.4.2 Ductilidad

En la Tabla 5.6 se aprecia un resumen de las deformaciones promedio alcanzadas al 80% de decaimiento de tensión máxima para las probetas ensayadas a tracción directa, las deformaciones promedio alcanzadas al 65% de degradación de tensión máxima para las probetas ensayadas a compresión y las deflexiones alcanzadas al 80% decaimiento de tensión máxima para las probetas ensayadas a flexión. Notar que el análisis comparativo de este punto solo se realizará entre ensayos de tracción y flexión, debido a que el ensayo de compresión se detuvo al 65% y no 80% de degradación de tensión máxima.

**Tabla 5.6: Cuadro resumen de deformaciones/deflexiones últimas de los ensayos.**

Mezcla	% Fibra	$\epsilon_{ult[65\%]}$ de Compresión (mm/mm)	$\epsilon_{ult[80\%]}$ de Tracción (mm/mm)	$\delta_{ult[80\%]}$ de Flexión (mm)
M1	0%	0.0058	0.00038	0.258
	1.23%	0.0076	0.01021	3.408
	2%	0.0111	0.01077	5.571
M2	0%	0.0059	0.00020	0.230
	1.23%	0.0073	0.00085	5.304
	2%	0.0096	0.01394	6.608

En las Figuras 5.16 y 5.17 se tienen las variaciones porcentuales promedio de las deformaciones o deflexiones últimas, definidas anteriormente, de los ensayos realizados a las probetas de hormigón reforzado con fibras, con respecto a su par sin fibra. En la Figura 5.16, correspondiente a la mezcla de árido grueso (M1) se observa un aumento sostenido de deformaciones/deflexiones últimas para todos los ensayos, siendo mucho más marcado en los ensayos a tracción directa (con incrementos de 2578% para un volumen de fibra de 1.23% y 2726% para un volumen de fibra del 2%) y flexión (con aumentos de 1222% para un volumen de fibra de 1.23% y 2061% para un volumen de fibra del 2%). Asimismo, en la Figura 5.17, correspondiente a la mezcla de árido fino (M2) también se muestra un aumento de deformaciones/deflexiones últimas para todos los ensayos, con tendencia a ser mucho más brusco el aumento en el ensayo de tracción directa (con incrementos de 325% para un volumen de fibra de 1.23% y 6885% para un volumen de fibra del 2%) por sobre el de flexión (con aumentos de 2205% para un volumen de fibra de 1.23% y 2771% para un volumen de fibra del 2%). Por su parte, en los ensayos de compresión se evidencia para ambas mezclas un aumento en las deformaciones últimas con respecto a las muestras sin fibra, teniendo un incremento de 30% para un volumen de fibra de 1.23% y 89% para un volumen de fibra del 2% en el caso del árido grueso M1, y un aumento de 23% para un volumen de fibra de 1.23% y 63% para un volumen de fibra del 2% en el caso del árido fino M2.

Lo anterior refleja que en presencia de árido grueso (M1), la ductilidad del FRC aumenta un 1900% para un volumen de fibra de 1.23% y 2394% para un volumen de fibra de 2%. Por otro lado, en presencia de árido fino (M2), la ductilidad del FRC aumenta un 1265% para un volumen de fibra de 1.23% y 4828% para un volumen de fibra de 2%. Por lo que, se deduce que el hormigón reforzado con fibras de PVA aumenta su ductilidad según el aumento de contenido de fibra en su interior.

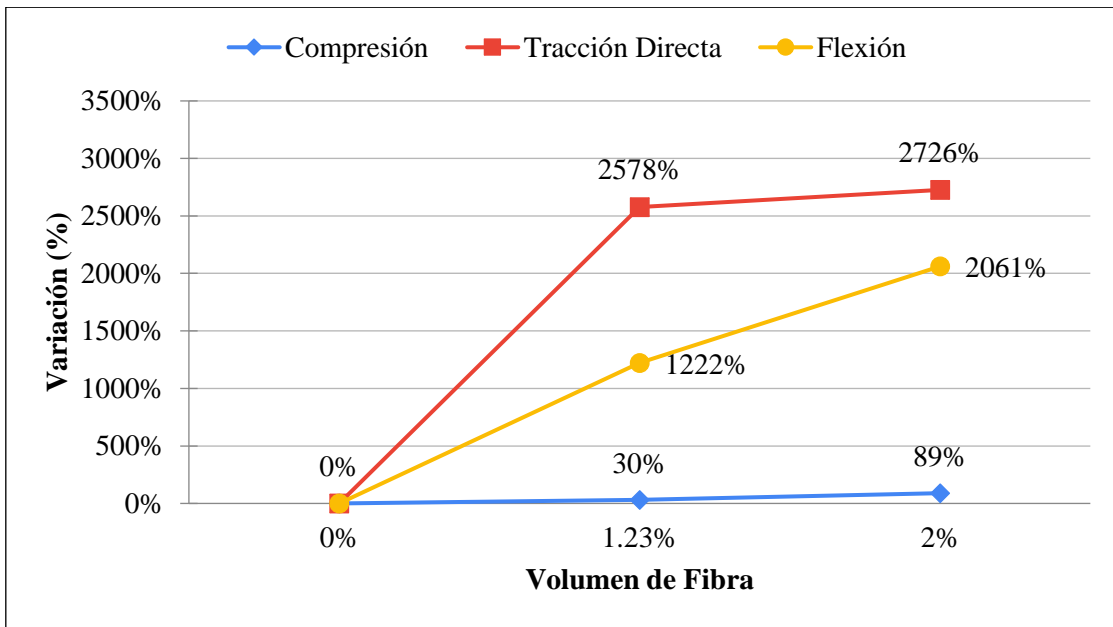


Figura 5.16: Variaciones porcentuales de deformaciones últimas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M1.

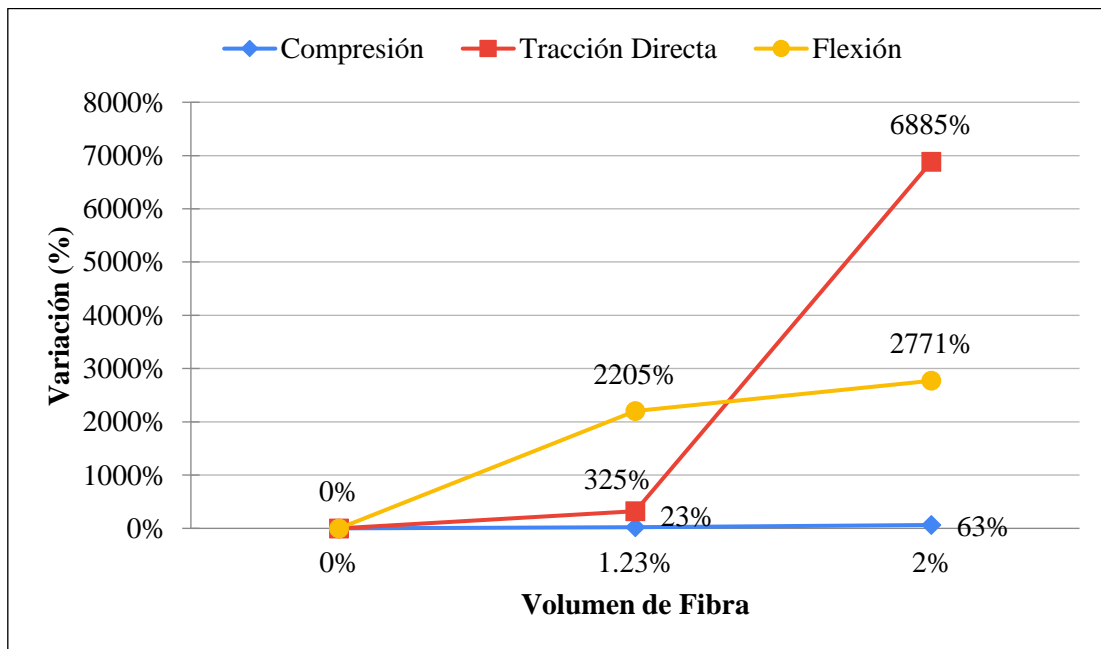


Figura 5.17: Variaciones porcentuales de deformaciones últimas alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con respecto a muestras sin fibra, M2.

### 5.4.3 Energía Post Fisuración

En la Tabla 5.7 se observa un resumen de las energías post fisuración promedio alcanzadas: al 80% de decaimiento de tensión máxima para las probetas ensayadas a tracción, al 65% de degradación de tensión máxima, y a los 3.02mm de deflexión, correspondiente a la tensión residual  $F_{R4}$ , para las probetas ensayadas a flexión.

**Tabla 5.7: Cuadro resumen de energía post fisuración de los ensayos.**

Mezcla	% Fibra	Energía Post Fisuración a Compresión (J)	Energía Post Fisuración Tracción (J)	Energía Post Fisuración a Flexión (J)
M1	0%	94.5	0.2	1.0
	1.23%	140.0	13.7	100.8
	2%	249.4	16.1	203.0
M2	0%	43.4	0.1	0.8
	1.23%	101.9	0.7	115.6
	2%	120.1	18.4	177.2

En las Figuras 5.18 y 5.19 se tiene la energía post fisuración, definida anteriormente, de los ensayos realizados a las probetas de hormigón reforzado con y sin fibras. En la Figura 5.18 se observa que para los ensayos a compresión, tracción y flexión de 1.23% de volumen de fibra en mezcla de árido grueso M1, la energía post fisuración aumentó 1.5, 65.8 y 99.4 veces con respecto a su par sin fibra, respectivamente, y para los mismos ensayos con un 2% de volumen de fibra aumentaron 2.6, 77 y 200 veces con respecto a la muestra sin fibra, respectivamente. Asimismo, en la Figura 5.19 de árido fino M2 se observa que la energía post fisuración en ensayos de compresión, tracción y flexión de 1.23% de volumen de fibra aumentó 2.3, 11.6 y 137 veces con respecto a la muestra sin fibra, respectivamente, y que para los mismos ensayos con un volumen de 2% de fibra, la energía aumentó 2.8, 285 y 210 veces con respecto a su par sin fibra, respectivamente.

Finalmente, se puede observar que la mezcla con áridos gruesos M1 presenta, en promedio, mayores resistencias, deformaciones/deflexiones y energías post fisuración en cada uno de los ensayos realizados en comparación con la mezcla de árido fino M2. Lo anterior confirma lo indicado por la literatura, ya que se espera un mejor comportamiento de fibra larga de PVA para hormigones de árido grueso.

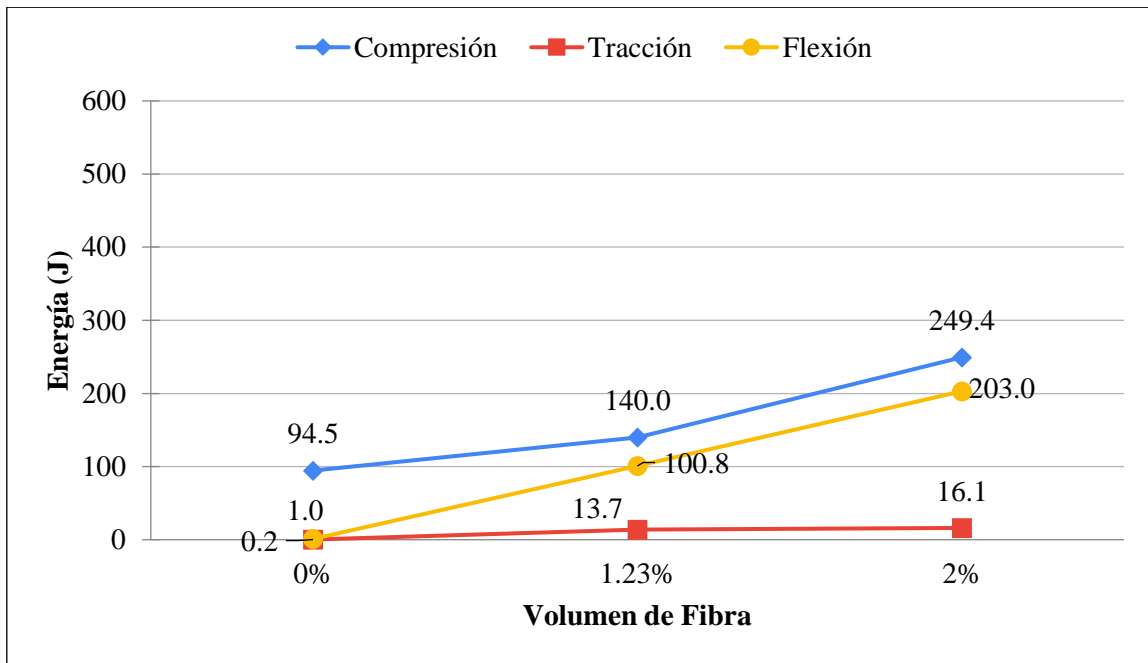


Figura 5.18: Energía post fisuración alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con árido grueso M1.

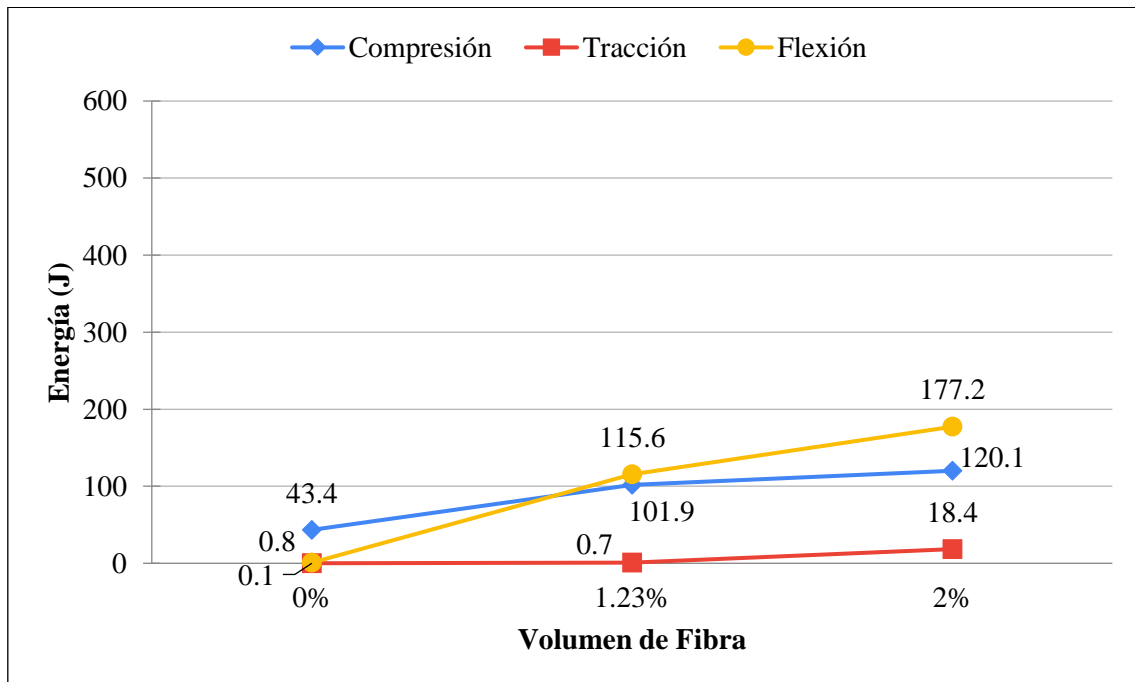


Figura 5.19: Energía post fisuración alcanzadas por los ensayos realizados a probetas de PVA FRC con árido fino M2.

## 6 Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación experimental, inspirada por el creciente interés en la tecnología del hormigón reforzado con fibras, cumplió con su objetivo principal, el cual consistía en estudiar la influencia de diferentes cuantías de fibras de PVA largas de 30mm, en la resistencia y ductilidad de probetas de FRC, para mezclas con árido grueso y fino.

Según lo señalado en la literatura, las fibras comienzan a adquirir carga una vez fisurada la matriz de hormigón, por lo que, al menos en la parte elástica todas las curvas debiesen ser similares hasta aproximadamente el 80% de tensión máxima, independiente del contenido de fibra. En general, este comportamiento se observó en las mezclas de árido grueso M1 y fino M2, para los tres tipos de ensayos realizados. Luego, en la parte plástica de todas las curvas se apreció una clara respuesta dúctil para ambas mezclas en presencia de contenido de fibra, salvo M2 con 1.23% de fibra. Esta última combinación resultó ser desafiante, debido a que las probetas tuvieron un comportamiento frágil en los ensayos a tracción, mientras que, en los ensayos a flexión sus respuestas fueron tremendamente dúctiles. La causa de este fenómeno está relacionada con que la fibra de PVA larga tiene una “falla de endurecimiento por deslizamiento” que se ve perjudicada por el alto contenido de finos en la mezcla, terminando, en la mayoría de los casos, con la fibra deslizándose por la matriz.

En un comienzo, se esperaba que la resistencia del hormigón reforzado con fibras de PVA fuese más o menos similar a la resistencia presentada por la misma mezcla de hormigón sin contenido de fibra. Lo anterior se fundamenta en que para observar aumentos significativos de resistencia en FRC, la fibra se debe presentar un módulo de elasticidad mayor que el de la matriz. En este caso ambos materiales se mueven entre rangos parecidos en cuanto a módulo de elasticidad, de ahí la poca variación esperada.

Adicional al punto anterior, diversas investigaciones previas describen que el incremento de contenido de fibra en la mezcla provoca dos efectos: pequeñas alteraciones en la resistencia máxima y un decaimiento con menor pendiente en la parte plástica. El primer efecto se observó para la mezcla con árido grueso M1 y fino M2 en los ensayos a tracción directa y compresión, los cuales variaron, en promedio, un 7% con respecto a la muestra sin fibra. Específicamente para estos ensayos, la M1 reveló la existencia de un contenido de fibras óptimo que maximiza la resistencia, el cual corresponde a 1.23%; y, por su parte, la M2 presentó variaciones positivas de resistencia máxima en comparación a la muestra sin fibra. Diferente fue el caso de las resistencias máximas en los ensayos a flexión, ya que, ambas mezclas mostraron aumentos promedios de más del 35% con respecto a las muestras sin fibra. En cuanto al segundo efecto, en general, se apreció que las curvas obtenidas de los ensayos realizados tenían decrecimientos paulatinos con menor inclinación según el aumento de fibras. Particular fue el caso del ensayo a tracción directa de M1, ya que, ambos contenidos de fibra provocaron, en promedio, una caída de la parte elástica similar en cuanto a pendiente.

Las ductilidades alcanzadas en los ensayos de tracción directa, compresión y flexión, señalan que la mezcla con árido grueso M1 fue, en promedio, un 128% más dúctil que la mezcla con árido

fino M2. En cuanto a la energía post fisuración determinadas para los ensayos de tracción directa, compresión y flexión, muestran que la mezcla con árido grueso M1 alcanzó, en promedio, energías 248% mayores que la mezcla con árido fino M2. Esto refuerza lo mencionado en otros estudios, y es que las fibras de PVA largas otorgan una mejor respuesta al hormigón con áridos gruesos.

En general, entre las muestras con el mismo contenido de fibra para la misma mezcla se advierte que a pesar de la baja repetitividad de ensayos, existe una baja dispersión en cuanto a resistencia máxima y ductilidad, en comparación con las muestras sin fibra, lo que indica que el estudio de fibras realizado es particularmente fidedigno. Adicionalmente, debido a que se consideró la recomendación del uso de aditivo plastificante, la trabajabilidad de las mezclas se vieron levemente afectadas por la incorporación de fibras de PVA, formándose pequeños nidos que fueron rápidamente disueltos con la mezcladora de cemento para lograr una distribución uniforme dentro de la matriz.

Con respecto a los modos de falla presentados en las probetas ensayadas, se puede mencionar que corresponden a fisuras validadas por los controles de calidad según su tipo ensayo, vale decir, que las fisuras que se produjeron se condicen con las esperadas.

Finalmente, se puede concluir que las fibras de PVA largas de 30mm le otorgan una gran ductilidad al hormigón reforzado, independiente del tamaño máximo de árido utilizado en la mezcla. Sin embargo, PVA FRC tiene una mejor respuesta dúctil en presencia de áridos gruesos. Por otro lado, las fibras tienden a aumentar la resistencia máxima de FRC en mezclas con árido fino, y exhibir un contenido óptimo de fibras para mezclas con árido grueso.

## 7 Bibliografía

- [1] Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan (2017), “*Design of Concrete Structures*” 14th Edition – Chapter 1.1.
- [2] Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. (2006). “*Concrete: Microstructure, properties, and materials*”. Mc Graw Hill, 3 Edition – Chapter 11.
- [3] Arnor Bentur & Sidney Mindess (2006). “*Fibre Reinforced Cementitious Composites*”.
- [4] Committe ACI 544 (1996), “*State-of-art report on fiber reinforced concrete*”, Reapproved 2009 – Chapter 1.
- [5] Khan, S. U. and 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.
- [6] Linzhu Sun, Qiang Hoa, Junliang Zhao, Dongyan Wu, Fang Yang (2018). “*Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression*”.
- [7] Bin, M. (2007). “*Tensile Behaviour of Concrete with Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber*”.
- [8] Victor C. Li, Shuxin Wang, and Cynthia Wu (2001), “*Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)*”. ACI Materials Journal.
- [9] Fan Yu, Daquan Sun, Jue Wang, Minjun Hu (2019) “*Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete*”.
- [10] EN 14651 (2005). “*Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual*”.
- [11] NCh 1037 (2009). “*Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*”.
- [12] NCh 1038 (2009). “*Hormigón – Ensayo de tracción por flexión*”.
- [13] NCh 1170 (2012). “*Hormigón - Ensayo de tracción por hendimiento*”.

## Anexos

### A. Análisis granulométrico

En esta sección se presenta el detalle de los resultados obtenidos del análisis granulométrico de la arena fina, arena gruesa y gravilla utilizadas en la investigación.

**Tabla A.1: Resultados de granulometría para arena fina.**

<b>Arena Fina (500gr de muestra)</b>				
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Pesos (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Pasa</b>
<b>2 1/2"</b>	<b>63.0</b>	0	0%	100%
<b>2"</b>	<b>50.0</b>	0	0%	100%
<b>1 1/2"</b>	<b>37.5</b>	0	0%	100%
<b>1"</b>	<b>25.0</b>	0	0%	100%
<b>3/4"</b>	<b>19.0</b>	0	0%	100%
<b>1/2"</b>	<b>12.5</b>	0	0%	100%
<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	0	0%	100%
<b>#4</b>	<b>4.75</b>	15	3%	97%
<b>#8</b>	<b>2.36</b>	12	5%	95%
<b>#10</b>	<b>2.00</b>	3	6%	94%
<b>#30</b>	<b>0.600</b>	12	9%	91%
<b>#40</b>	<b>0.425</b>	11	11%	89%
<b>#50</b>	<b>0.300</b>	29	17%	83%
<b>#100</b>	<b>0.150</b>	202	58%	42%
<b>#200</b>	<b>0.075</b>	162	90%	10%
<b>Fondo</b>		47	100%	0%



Tabla A.2: : Resultados de granulometría para arena gruesa.

<b>Arena Gruesa (500gr de muestra)</b>				
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Pesos (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Pasa</b>
2 1/2"	63.0	0	0%	100%
2"	50.0	0	0%	100%
1 1/2"	37.5	0	0%	100%
1"	25.0	0	0%	100%
3/4"	19.0	0	0%	100%
1/2"	12.5	0	0%	100%
3/8"	9.5	0	0%	100%
#4	4.75	70	14%	86%
#8	2.36	123	39%	61%
#10	2.00	32	45%	55%
#30	0.600	154	76%	24%
#40	0.425	35	83%	17%
#50	0.300	26	89%	11%
#100	0.150	34	96%	4%
#200	0.075	17	99%	1%
Fondo		5	100%	0%

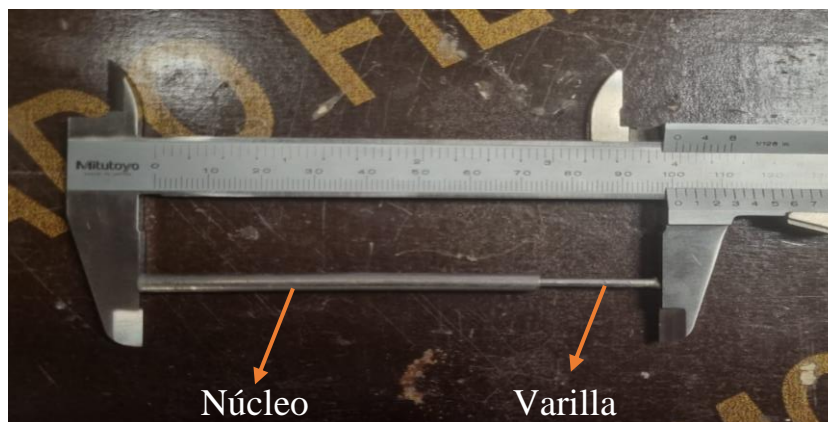
Tabla A.3: Resultados de granulometría para gravilla.

<b>Gravilla (19mm -&gt; 5kg de muestra)</b>				
<b>Tamiz N°</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Pesos (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Pasa</b>
2 1/2"	63.0	0	0%	100%
2"	50.0	0	0%	100%
1 1/2"	37.5	0	0%	100%
1"	25.0	0	0%	100%
3/4"	19.0	365	7%	93%
1/2"	12.5	2530	58%	42%
3/8"	9.5	1110	81%	19%
#4	4.75	915	99%	2%
#8	2.36	35	100%	0%
#10	2.00	0	100%	0%
#30	0.600	0	100%	0%
#40	0.425	0	100%	0%
#50	0.300	0	100%	0%
#100	0.150	0	100%	0%
#200	0.075	0	100%	0%
Fondo		0	100%	0%

## B. Calibración de los sensores LVDT (Linear Variable Displacement Transducers)

En esta sección se describe el procedimiento realizado para calibrar los sensores LVDT de alta precisión utilizados en la investigación. Cabe destacar que ambos fueron debidamente identificados para conectarse siempre en el mismo canal con el objetivo de tener un análisis de datos congruente.

En primer lugar, los sensores están compuestos por un núcleo de níquel con hierro de alta permeabilidad atornillado a una varilla (ver Figura B.1) y un casquete cilíndrico que contiene una capa magnética de alta permeabilidad cubierta por acero inoxidable (ver Figura B.2).



**Figura B.1: Esquema de componentes internos del sensor LVDT.**



**Figura B.2: Esquema de componentes externos del sensor LVDT.**

Los sensores miden el voltaje producido por el deslizamiento del núcleo dentro del casquete cilíndrico y sus rangos menos efectivos de medición se encuentran en los extremos, donde la interacción entre el núcleo y la capa magnética del casquete se vuelve no lineal.

Para realizar la calibración, se fija el casquete del sensor junto a una regla en una superficie nivelada. Posteriormente, se mueve el núcleo con ayuda de la varilla cada 10mm procurando abarcar la longitud completa del casquete de adentro hacia afuera y de afuera hacia adentro. Notar que el núcleo siempre se debe mantener dentro del casquete, y entre los intervalos de 10mm se debe dejar quieto el núcleo durante unos segundos para que se establezca la lectura. De esta manera, se obtiene un gráfico Voltaje vs Tiempo escalonado, donde se aprecia que las pendientes indican la variación de voltaje según el desplazamiento realizado.

En las Figuras B3-B6 se observan 4 recorridos realizados para cada sensor y en las Tablas B.4 y B.5 se encuentran tabulados cada uno de los voltajes obtenidos según los 10mm de desplazamiento aplicados.

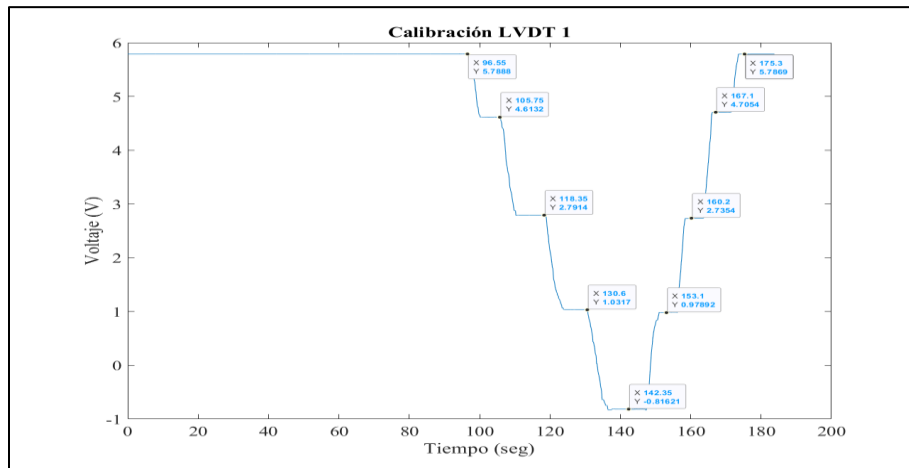


Figura B.3: Primera lectura de LVDT 1.

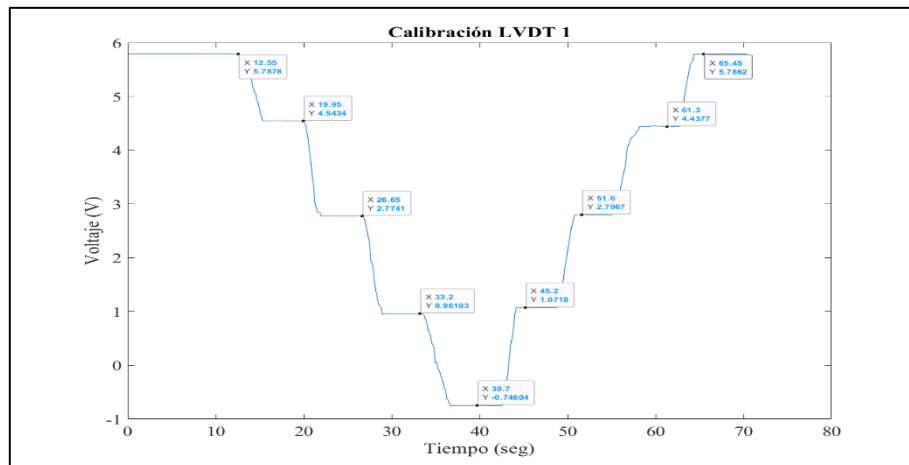
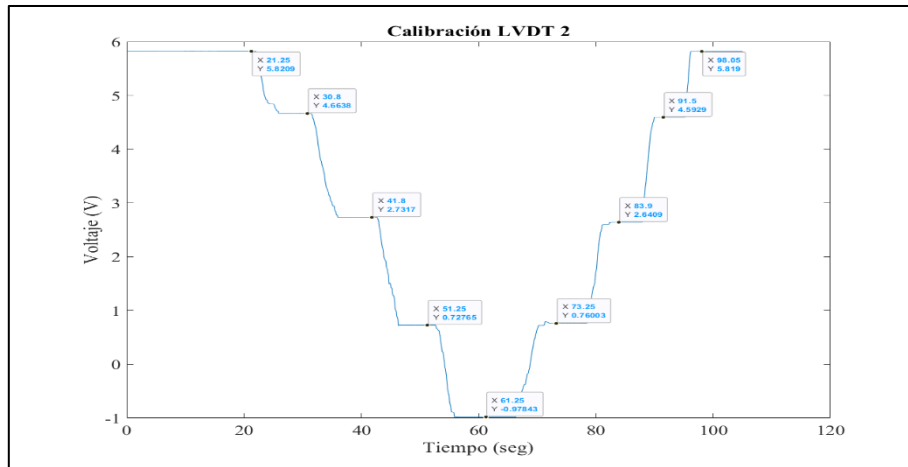
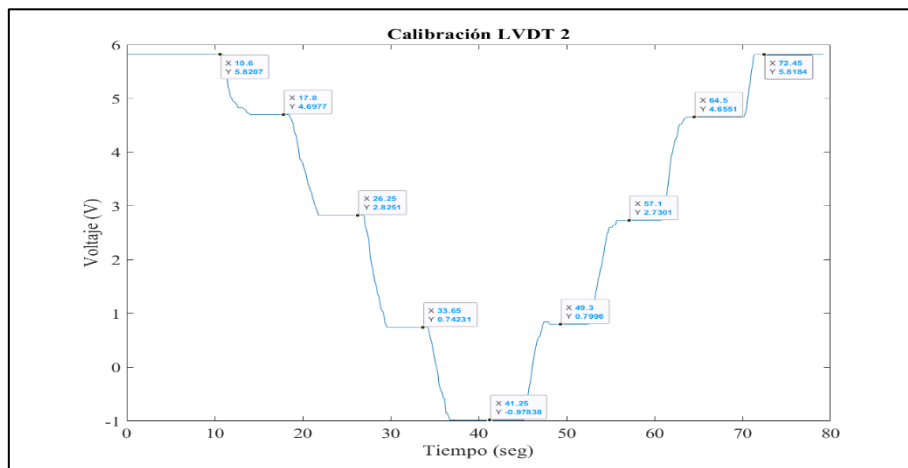


Figura B.4: Segunda lectura de LVDT 1.



**Figura B.5: Primera lectura de LVDT 2.**



**Figura B.6: Segunda lectura de LVDT 2.**

Finalmente, en la Tabla B.6 se observan las calibraciones promedio correspondientes a cada sensor. Notar que se eliminaron las lecturas de los extremos producto de la no linealidad del comportamiento núcleo casquete magnético.

**Tabla B.4: Puntos de calibración LVDT 1.**

LVDT1.1			LVDT1.2		
V	mm	Pendiente (mm/V)	V	mm	Pendiente (mm/V)
5.788	0	8.506	5.787	0	8.036
4.613	10	5.489	4.543	10	5.652
2.791	20	5.682	2.774	20	5.515
1.031	30	5.411	0.961	30	5.858
-0.816	40		-0.746	40	
-0.816	40	5.570	-0.746	40	5.501
0.978	30	5.693	1.071	30	5.797
2.735	20	5.076	2.796	20	6.093
4.705	10	9.246	4.437	10	7.415
5.786	0		5.786	0	
<b>Promedio</b>		<b>5.487</b>	<b>Promedio</b>		<b>5.736</b>

**Tabla B.5: Puntos de calibración LVDT 2.**

LVDT2.1			LVDT2.2		
V	mm	pendiente (mm/V)	V	mm	Pendiente (mm/V)
5.820	0	8.642	5.820	0	8.904
4.663	10	5.175	4.697	10	5.340
2.731	20	4.989	2.825	20	4.801
0.727	30	5.861	0.742	30	5.811
-0.978	40		-0.978	40	
-0.978	40	5.752	-0.978	40	5.624
0.760	30	5.316	0.799	30	5.180
2.641	20	5.123	2.730	20	5.194
4.593	10	8.155	4.655	10	8.596
5.819	0		5.818	0	
<b>Promedio</b>		<b>5.370</b>	<b>Promedio</b>		<b>5.325</b>

**Tabla B.6: Calibración final de los sensores LVDT.**

Sensor	Promedio pendientes (mm/V)	
LVDT1-1	5.487	5.612
LVDT1-2	5.736	
LVDT2-1	5.370	5.348
LVDT2-2	5.325	