



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

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 5D 65/60**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SANTIAGO ANDRÉS PEÑA LABBÉ

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2022

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO 5D 65/60

El hormigón es el material más utilizado en la construcción y un elemento que, compuesto con acero, se ha logrado una gran resistencia tanto a compresión como a tracción, permitiendo, incluso, una mayor deformación. Ya que es de suma importancia poder proporcionar materiales con capacidad de deformación plástica para un país sísmico, evitando de esta forma fallas frágiles e instantáneas, es necesario seguir estudiando este material mediante diferentes formas de otorgar este incremento dúctil. Debido a esto, el presente informe es el resultado del estudio del hormigón reforzado con fibras de acero de tipo 5D y 60 mm de largo. Para esto se generaron dos mezclas, M1 y M2, cuya principal diferencia es el tamaño del árido, contando la primera con árido grueso y fino mientras que la segunda solo posee árido fino. También se le añadió a cada mezcla 3 dosificaciones de fibras (0 %, 0.5 % y 1 % del volumen) para poder someter cada dosificación a ensayos de tracción, compresión y flexión de 3 puntos con el objetivo de poder caracterizar el material y estudiar la ductilidad y energía alcanzada. Una vez obtenidos los resultados, se observó que la fibra, debido a su largo, funciona mejor para la mezcla M1 cuyo árido es mayor y le permite, gracias a esto, anclarse mejor a la matriz. Para la zona elástica de las curvas no se produjo grandes diferencias o una tendencia clara a aumentar o reducir su resistencia frente al aumento de la dosis de fibras, sin embargo, para la zona post fisuración, en la mayoría de los casos si se logró un gran aumento de deformación y energía post fisuración con respecto al material sin fibras, exceptuando los ensayos a tracción de la mezcla M2 en donde todas las probetas fallaron de forma frágil. Siguiendo con lo anterior, para los ensayos a tracción directa no se logró la representatividad esperada debido a que las curvas generadas para las diferentes dosis de fibras arrojaron resultados muy variados producto de los efectos de las condiciones de borde para una probeta pequeña en comparación al largo de la fibra, alterando, de esta forma, la distribución y orientación de las fibras. Con respecto a los resultados a compresión, al aumentar la dosis de fibras la caída post fisuración es más suave y la curva se vuelve asintótica al eje de la deformación. Por último, las viguetas ensayadas a flexión de 3 puntos alcanzaron la deformación por endurecimiento para la mezcla M1 con 0.5 %, 1 % y la mezcla M2 con 1 % siendo la dosis de 0.5 la única mezcla con fibras que no logró superar la resistencia máxima elástica. Junto a esto, los valores de deflexión en viguetas con fibras alcanzaron los 8 mm contando, incluso, con la capacidad resistente para poder seguir deformándose. De esta forma, se comprobó el efecto puente de las fibras en el hormigón y cómo éste permite controlar un mayor tamaño y altura de grieta sin generar caídas abruptas de tensiones. Por último, los valores del incremento energético post fisuración comparado con el material sin fibras para los ensayos a tracción de la mezcla M1 fueron de 59 y 21 veces para las probetas de 0.5 % y 1 % de volumen de fibras. Para la mezcla M2, los resultados fueron frágiles por lo que no se logró un mayor incremento. Por otro lado, los resultados a compresión para la mezcla M1 arrojaron un aumento de 3.3 y 3.6 veces mientras que para la mezcla M2 fueron de 2.8 veces y 13.1 veces. Para los ensayos a flexión se lograron cantidades mucho mayores. Considerando los valores hasta los 8 mm de deflexión, la mezcla M1 alcanzó un incremento de energía de 1045 y 1233 veces para las viguetas con 0.5 % y 1 % de fibras respectivamente. Para la mezcla M2, estos resultados dieron del orden de las 914 y 1790 veces para 0.5 % y 1 % de fibras.

Agradecimientos

Primero que todo quiero empezar agradeciéndole a una persona muy especial y que merece las primeras líneas; mi mamá, que me inculcó el trabajo duro, esfuerzo y compromiso. Sin ella definitivamente no hubiera logrado estar escribiendo esta memoria. Infinitas gracias por abrirme los ojos y hacerme ver que podía entregar más de lo que estaba entregando y que el esfuerzo rinde frutos. Gracias por los picoteos, galletas, jugos, etc. que me acercaste cada vez que me veías estresado estudiando y gracias por entenderme cada vez que andaba de mal genio y angustiado por una prueba. Por otra parte, agradecer a mi papá, que cumplió un rol fundamental en mi carrera, mostrándome desde chico el casco y las maravillas de la construcción. Me enseñaste lo que es amar tu profesión, a trabajar duro y de forma alegre, sin quejas ni reclamos y a que depende de uno que tan lejos se puede llegar, gracias por estar siempre presente a pesar de la distancia y por permitirme estudiar lo que me apasiona. Gracias a mis hermanos, abuela, a mi polola junto con sus papás y al resto de mi familia por el apoyo incondicional durante este proceso de titulación.

Le agradezco profundamente a mi profesor Guía Leonardo Massone, con el cual fue un verdadero honor poder hacer mi memoria, por todo su compromiso, ayuda y consejos cada vez que se necesitaron. Gracias a Omar, Mario, al profesor Pedro Soto y a Victor por ayudarme en el laboratorio y en los ensayos. También agradecerle a Jonatan Cortez por todo su apoyo, recomendaciones y por tener una increíble disposición para cada duda que fue surgiendo en el proceso del trabajo de título.

Agradecerle a mis grandes amigos Tomás Guldman, Vicente Polloni y Diego Silva por estar siempre para mi y apoyarme en los momentos más difíciles. También agradecerle a toda la gente que conocí en mi camino por la universidad, a cada persona con la que estudié, compartí y reí, entre algunos, Vicente Boudet y Tomás Fortuño. Gracias sobre todo a mis amigos de civil Giovanni, Matías (Roger), Jorge y Jerko por todo lo vivido en estos años, por las experiencias buenas y malas, y por hacer de la universidad un lugar más ameno.

Por último, agradecerle a los profesores de matemática que tuve el placer de tener en el colegio, los cuales me motivaron y impulsaron al mundo de las matemáticas.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación y Contexto	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Características de las fibras de acero	3
2.2. Utilidades y beneficios de las fibras en el hormigón	3
2.3. Modos de falla de las fibras en la matriz de hormigón	4
2.4. Influencia de la fracción volumétrica de la fibra y tamaño máximo del árido en la trabajabilidad	6
2.5. Variables principales en la respuesta dúctil del hormigón con fibras de acero .	8
2.5.1. Largo de fibra, tamaño de árido y relación de aspecto	8
2.5.2. Dosis de fibra	11
2.5.3. Número de gancho	13
2.6. Efecto de la orientación y distribución de las fibras	14
3. Metodología Experimental	17
3.1. Materiales	17
3.1.1. Fibra de Acero	18
3.2. Granulometría	18
3.3. Probetas	25
3.3.1. Confección de Probetas Cilíndricas	26
3.3.2. Confección de Viguetas	28
3.4. Ensayos	29
3.4.1. Ensayos a Tracción	29
3.4.2. Ensayos a Compresión	30
3.4.3. Ensayos a flexión	32
3.4.4. Resumen de probetas fabricadas	33
4. Resultados y Análisis	35
4.1. Ensayos a Tracción	35
4.2. Ensayos a Compresión	41
4.3. Ensayos a Flexión	45
4.4. Comparación entre Ensayos	52

5. Conclusiones	57
Bibliografía	60
Anexos	62
A. Resistencia vs tiempo de fraguado	62
B. Documentación Probetas	62

Índice de Tablas

3.1.	Propiedades de la fibra de acero Dramix 5D 65/60 BG	18
3.2.	Porcentaje de humedad arena fina	19
3.3.	Porcentaje de humedad arena gruesa	19
3.4.	Número de tamiz y tamaño de apertura	21
3.5.	Granulometría arena fina	22
3.6.	Granulometría arena gruesa	23
3.7.	Granulometría gravilla	24
3.8.	Dosificaciones	25
3.9.	Número de probetas cilíndricas confeccionadas.	26
3.10.	Número de viguetas confeccionadas.	26
3.11.	Dimensiones de las probetas	26
3.12.	Tiempo de fraguado probetas cilíndricas a tracción	33
3.13.	Tiempo de fraguado probetas cilíndricas a compresión	34
3.14.	Tiempo de fraguado viguetas	34
4.1.	Resultados ensayos a tracción	36
4.2.	Resultados ensayos a compresión	42
4.3.	Resultados ensayos a flexión de 3PBT	46
4.4.	Tensiones residuales	50

Índice de Ilustraciones

2.1.	Fibras según anclaje [8]	3
2.2.	Extracción de fibra [14]	5
2.3.	Trabajabilidad en función del volumen de fibras para diferentes relaciones de aspecto (Hannant, 1978)	6
2.4.	Dispersión de las fibras con diferentes tamaños de árido [2]	7
2.5.	Efecto del largo de fibra y tamaño máximo de árido en la trabajabilidad del hormigón con fibras de acero. [6]	7
2.6.	Ensayo a compresión para diferentes largos de fibras y tamaño máximo de árido [6]	8
2.7.	Ensayo a tracción por hendimiento para diferentes largos de fibras y tamaño máximo de árido [6]	9
2.8.	Ensayo a flexión 3PBT para diferentes largos de fibras [6]	10
2.9.	Ensayo a compresión en función de la relación de aspecto [13]	10
2.10.	Ensayo a flexión en función de la relación de aspecto [13]	11
2.11.	Ensayo a flexión 4PBT en viguetas para diferente número de gancho y volumen de fibras [4]	12
2.12.	Ensayo a flexión 3PBT para diferentes dosis de fibras [5]	12
2.13.	Ensayo a compresión para diferentes volúmenes de fibras [10]	13
2.14.	Ensayo "pull-out" para fibras 3D, 4D y 5D	14
2.15.	Distribución de fibras en una probeta cilíndrica [17]	15
2.16.	Condiciones de contorno [21]	16
3.1.	Cuarteado	19
3.2.	secado de muestras	20
3.3.	Curva granulométrica	24
3.4.	Granulometría	25
3.5.	28
3.6.	Moldes Prismáticos	29
3.7.	Montaje de ensayo a tracción	30
3.8.	Rectificado de probetas cilíndricas	31
3.9.	Montaje de ensayo a compresión	31
3.10.	Montaje ensayo a flexión de 3 puntos	32
4.1.	Ensayos a tracción directa para mezcla M1	36
4.2.	Ensayos a tracción directa para mezcla M2	37
4.3.	Energía post fisuración (hasta el 80% de degradación de la carga máxima) a tracción directa para mezclas M1 y M2	37
4.4.	Deformación unitaria última (al 80% de degradación de la carga máxima) a tracción directa para mezclas M1 y M2	38
4.5.	Fallas probetas M1-0.5% v2 y M1-1% v1	40

4.6.	Ensayos a compresión para mezcla M1	42
4.7.	Ensayos a compresión para mezcla M2	43
4.8.	Energía post fisuración (al 65 % de degradación de la carga máxima) a compresión para mezclas M1 y M2	43
4.9.	Deformación unitaria última (al 65% de degradación de la carga máxima) a compresión para mezclas M1 y M2	44
4.10.	Ensayos a flexión de 3PBT para mezcla M1	46
4.11.	Ensayos a flexión de 3PBT para mezcla M2	47
4.12.	Energía post fisuración a flexión hasta los 8 mm de deflexión, mezclas M1 y M2	47
4.13.	Tensiones Residuales Promedio	51
4.14.	Variación porcentual tensiones en peak elástico ensayos a compresión, flexión y tracción, mezclas M1 y M2	53
4.15.	Energía post fisuración ensayos a compresión, flexión y tracción, mezclas M1 y M2	55
4.16.	Variación de deformación última ensayos a compresión (65 % de degradación) y tracción (80 % de degradación), mezclas M1 y M2	56
A.1.	Curva de resistencia en función del tiempo	62
B.1.	Fallas Tracción M1	63
B.2.	Fallas Tracción M2	64
B.3.	Fallas Compresión M1	65
B.4.	Fallas Compresión M2	66
B.5.	Fallas flexión	67

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y Contexto

El hormigón es un material muy utilizado en la construcción debido a su alta resistencia y bajo costo. Sin embargo, es un material muy frágil cuya resistencia a la tracción es bastante reducida. Es por esto que surge el hormigón armado, material compuesto por hormigón y refuerzo de acero, el cual, en el caso de estudio, es de fibras de acero en lugar del refuerzo tradicional de barras largas y estribos.

El uso de fibras de acero en el hormigón tiene como principal objetivo el de reducir e impedir el agrietamiento y desprendimiento del material deteriorado, esto se debe a que las fibras otorgan una mayor ductilidad al elemento compuesto, siendo la ductilidad la capacidad de un material para deformarse sin romperse, es decir, de absorber energía permitiendo una deformación plástica. Los estudios indican que el hormigón con fibras de acero cumple con demandas estructurales (de pequeño tamaño) y logra un gran desempeño tanto a flexión como a compresión, permitiendo así, su uso en algunos elementos estructurales como vigas.

Mencionado esto, este informe se dividirá en diferentes secciones, partiendo con los objetivos y alcances mostrados a continuación, siguiendo con la revisión bibliográfica en donde se detallará la información más importante recopilada de la literatura, la cual es de gran importancia para entender la teoría del estudio realizado. Posterior a esta sección se encuentra la metodología de trabajo, donde se describirá cada trabajo ejecutado y cuyos resultados se indicarán en la sección final.

Por último, este estudio seguirá una metodología de ensayos similar a la indicada en las memorias de Jaime Revco [15] y Alejandro Arenas [19] a modo de permitir futuras comparaciones entre cada estudio de hormigón realizado .

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar de forma experimental la respuesta del uso de fibras de acero en el hormigón. En específico, lograr caracterizar la respuesta mecánica del material compuesto con el fin de incorporar su uso en elementos estructurales , cuyo requerimiento dúctil podría ser alcanzado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar, principalmente, el incremento en ductilidad y en energía absorbida por el hormigón al añadir fibras de acero mediante ensayos en laboratorio a modo de poder realizar la caracterización del material.
- Realizar ensayos de compresión y tracción en probetas cilíndricas de hormigón con y sin fibras de acero y comparar las curvas de esfuerzo-deformación con las obtenidas por hormigón puro (sin acero).
- Realizar ensayos en viguetas de hormigón con y sin fibras de acero para estudiar, mediante curvas de esfuerzo-deformación, su incremento en la capacidad a flexión de la zona dúctil.
- Comparar y analizar los resultados experimentales, específicamente el comportamiento dúctil y capacidad de absorción de energía del material.

1.3. Alcances

Se busca comprobar si la resistencia y ductilidad asociada al hormigón con fibras de acero permite su uso como elemento estructural para construcciones de menor tamaño, logrando de esta forma el reemplazo de la armadura convencional. Esto se pretende lograr por medio de ensayos en laboratorio como lo serían ensayos a compresión, tracción y flexión usando probetas cilíndricas y viguetas. Por último, este estudio se elaboró en forma simultánea y similar con otros 3 memoristas, diferenciando únicamente el tipo de fibra para permitir, de esta forma, comparar diferentes respuestas de hormigones con fibras en futuras investigaciones. Para el caso de esta memoria, se reducirá únicamente a la caracterización de fibras de acero con extremo de gancho de tipo DRAMIX 5D de largo 60 mm y relación de aspecto de 65 (largo/diámetro), usando dos mezclas y tres dosificaciones diferentes de fibras (0 %, 0.5 % y 1 %).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Características de las fibras de acero

Existen diferentes tipos de fibras, tales como las de vidrio, de poliéster, nylon, polipropileno y de acero (entre otras). Esta última será la fibra de estudio para el presente informe, que corresponden a pequeños tramos discretos de acero, es decir, con forma de barras rectas, delgadas y pequeñas que poseen una determinada relación de aspecto definida por la división entre el largo y su diámetro. Por otra parte, las fibras de acero pueden diferenciarse también por su forma, donde se encuentran las onduladas, rectas y con extremos en gancho, siendo este último el caso estudiado. Las fibras de acero de extremos en gancho se producen con un proceso de trefilado en frío (estirado mecánico), que no modifica la estructura del acero [2]. Se caracteriza y diferencia por el tipo de anclaje que posee (ganchos a los extremos de la fibra), pudiendo ser de tipo 3D, 4D o 5D, tal como se muestran en la siguiente imagen:

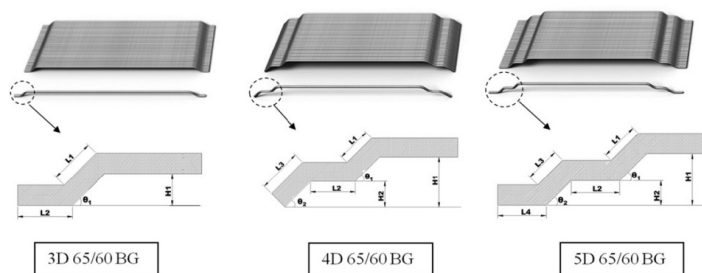


Figura 2.1: Fibras según anclaje [8]

Por último, otra característica para este tipo de fibras es que se pueden encontrar para diferentes longitudes y espesores (relación de aspecto). Todo lo indicado previamente tiene diferentes efectos en la respuesta dúctil del material, la cuál será especificada en las secciones siguientes.

2.2. Utilidades y beneficios de las fibras en el hormi-gón

El uso de fibras en el hormigón se volvió muy común puesto que otorga mejoras considerables en su respuesta dúctil, permitiendo un incremento en la resistencia a flexión, tracción

y propiedades de fatiga. Con esto se permite evitar el agrietamiento y desprendimiento temprano del material, mejorando su resistencia post agrietamiento y la capacidad de absorber energía [1]. También, existen otros beneficios obtenidos con el uso de fibras tales como una mayor resistencia al corte, mayor resistencia a las cargas dinámicas y reducción del agrietamiento por retracción del hormigón [17]. En cuanto a lo económico, se pueden obtener grandes beneficios en comparación a la armadura convencional ya que, entre otras cosas, se requiere menor mano de obra para su confección debido a que no se debe montar la armadura, por esto mismo, además de reducir la mano de obra los tiempos de construcción disminuyen (es más instantáneo) [1]. Por otra parte, el tiempo y la dificultad de transporte disminuye, las actividades como el doblado y corte dejan de ser requeridas y, además, se facilita su almacenamiento [4]. Dado lo anterior, es un material muy usado en pavimentos, pisos industriales y paredes de túneles.

2.3. Modos de falla de las fibras en la matriz de hormigón

El aumento en ductilidad para una matriz de hormigón reforzada con fibras de acero se debe específicamente a la atribución de la resistencia a tracción que posee el acero, la cual se encuentra muy por encima a la del hormigón, que responde de manera frágil frente a la tracción. Es por esto que las fibras de acero permiten generar una resistencia adicional a la apertura de la grieta, generando un efecto de puente en donde la apertura de la grieta traccionada genera una tensión que recae directamente sobre las fibras de acero, que, a su vez, generan resistencia impidiendo su rápida propagación. Es por esto que es importante para este estudio conocer las posibles fallas que puede experimentar el hormigón con fibras de acero, entre las cuales se encuentra la falla por extracción de la fibra (pullout) y la falla por rotura de la fibra.

Respecto al mecanismo de extracción de la fibra, este se puede clasificar de dos formas, el primero se denomina comportamiento de ablandamiento por deslizamiento mientras que el segundo se define como el comportamiento de endurecimiento por deslizamiento, siendo ambas respuestas dependientes de las propiedades de la superficie interfacial entre la fibra y la matriz de hormigón. El ablandamiento por deslizamiento se produce generalmente en fibras lisas y rectas cuando, posterior a la separación del extremo final de la fibra con el concreto, esta, siendo traccionada empieza a deslizar y despegarse de la matriz de hormigón por el mismo espacio que ocupaba en el material, reduciendo así su área de unión a la matriz dado que el largo de empotramiento se empieza a acortar. Con esto, además del deslizamiento, se tiene la reducción del diámetro de la fibra producto de la deformación inducida (efecto de la relación de Poisson), lo que se traduce finalmente en una disminución de la fuerza normal transmitida de la matriz de hormigón hacia la fibra. Por otra parte, el endurecimiento por deslizamiento ocurre específicamente en fibras dobladas y/o tratadas la cual sería la respuesta esperada para el caso de estudio dado los extremos en forma de gancho que posee la fibra 5D. En este caso lo que sucede es un incremento en la resistencia a la extracción de la fibra producto de la geometría (curvas o dobleces para mejorar anclaje y adherencia), siendo esta el equivalente al roce entre la fibra y la matriz adicionada a una resistencia extra producida por el anclaje de la fibra en sus extremos. Existen casos de fibras en los que, pese a no poseer

curvaturas en su geometría para mejorar el anclaje, disponen de un recubrimiento que les otorga la capacidad de laminarse y desgastarse en la interfaz, incrementando la fuerza de roce. El efecto descrito se puede encontrar en fibras de PVA aceitadas, por el contrario, el caso de fibras de acero no posee la capacidad de dañarse lo suficiente en su superficie para poder generar el endurecimiento por deslizamiento, es por esto que se modifica su geometría curvando los extremos para lograr este efecto. En la siguiente imagen se puede notar el efecto producido por una respuesta de endurecimiento por deslizamiento (Slip hardening) que logra una sobre resistencia en el punto C, y el ablandamiento por deslizamiento (slip softening) donde se reduce rápidamente su resistencia (curva entre B y D. El punto A indica el momento en el cual la fibra despega su punta extrema de la matriz de hormigón al cual estaba adherida de forma interna para dar inicio al deslizamiento de la fibra dentro de la matriz [14].

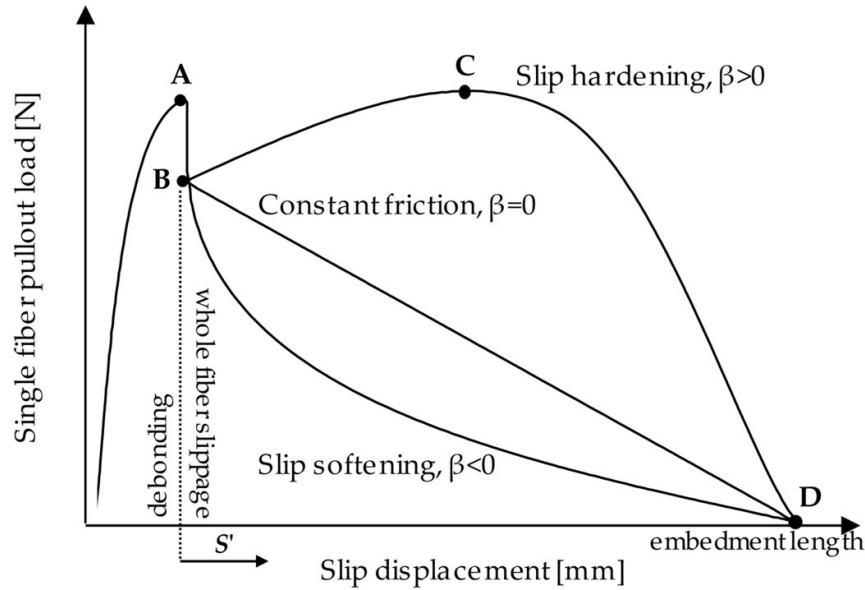


Figura 2.2: Extracción de fibra [14]

Por otra parte, existe la posibilidad de que la fibra falle por rotura. Este tipo de falla ocurre cuando el empotramiento de la fibra en la matriz es del largo necesario para asegurar la fluencia por sobre el deslizamiento. En este caso, el aumento de la superficie de contacto con la matriz, sumado a la resistencia extra proporcionada por los ganchos de la fibra (en el caso de fibras con extremo en forma de gancho) evitan que se sobrepase la tensión adherente y, con ello, se promueve la falla por rotura de la fibra.

El largo crítico o también conocido como largo de desarrollo se puede modelar de la siguiente forma para el caso de una fibra :

$$l_c = \sigma_{fu} \cdot \frac{d}{2\tau} \quad (2.1)$$

Donde σ_{fu} es la tensión última, d el diámetro de la fibra y τ corresponde a la tensión de adherencia promedio [16].

2.4. Influencia de la fracción volumétrica de la fibra y tamaño máximo del árido en la trabajabilidad

La cantidad de fibras de acero en el hormigón, denominada como la fracción volumétrica de fibras de acero (V_f), refleja la masa del acero por unidad de volumen y tiene un efecto positivo en la ductilidad del material a medida que este valor se incrementa. Sin embargo, se debe tener presente que a mayor cantidad de fibras y mayor relación de aspecto de la fibra (largo/diámetro) la trabajabilidad disminuye [9] (capacidad de fluir del hormigón). A continuación, se muestra el efecto de la fracción volumétrica para diferentes relaciones de aspecto en la trabajabilidad, medido por medio de un ensayo llamado V-B (o VeBe).

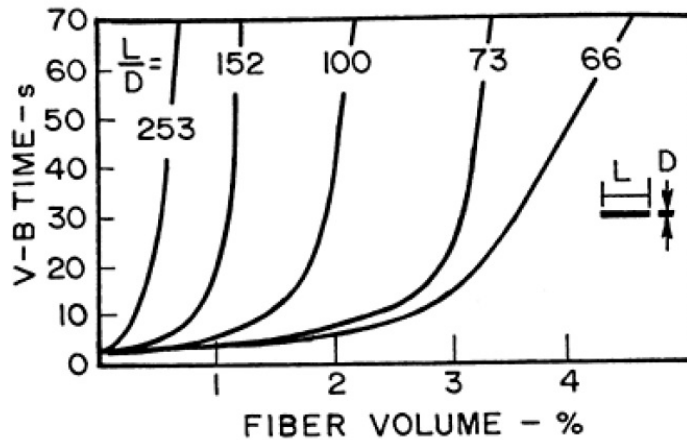


Figura 2.3: Trabajabilidad en función del volumen de fibras para diferentes relaciones de aspecto (Hannant, 1978)

Se estima que hasta 10 segundos es un valor aceptable de trabajabilidad según el ensayo VeBe (Edgington, Hannant and Williams, 1974), por lo que, según la imagen mostrada, para un rango de relación de aspecto de 50-100, los cuáles son los valores más comunes de estudio [9] y los determinados por la norma ACI 318-19 [12], se tiene que un porcentaje de hasta 1% sigue cumpliendo con una buena trabajabilidad en todo ese rango. Por esto, es posible afirmar que la cuantía a utilizar para el presente estudio (valores probables de 0, 0.5 y 1%) no traerá problemas de trabajabilidad.

Por otra parte, el tamaño máximo del árido tiene un gran efecto en la dispersión de las fibras y la fluidez del material, puesto que, a mayor tamaño de árido, el volumen destinado para fibras es menor y la acumulación de ellas se vuelve mayor, provocando una menor homogeneidad en la dispersión y causando resultados poco representativos [2]. La siguiente imagen muestra el claro efecto descrito previamente, con lo que es importante tener en cuenta para la elección del tamaño máximo, que su valor no sea mayor a 15-20 mm para evitar la formación de erizos (aglomeración de fibras).

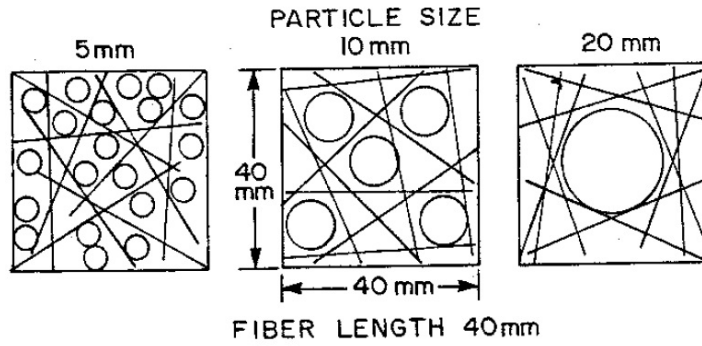


Figura 2.4: Dispersión de las fibras con diferentes tamaños de árido [2]

Siguiendo la misma línea, para un mayor tamaño de árido ocurre un efecto positivo en la trabajabilidad producto de una menor área envuelta en la matriz de cemento fresco en comparación a áridos de menor tamaño donde el área que envuelve el cemento es mayor, aumentando, de esta forma, su trabajabilidad y fluidez [6]. Respecto al largo de la fibra, la trabajabilidad aumenta con su incremento dado que, al tener un largo mayor, la cantidad de fibras para un mismo volumen de acero es menor al igual que la superposición entre fibras, traduciéndose a una reducción en el efecto de red entre la matriz de cemento fresco y las fibras de acero [6]. Los efectos anteriores se pueden visualizar en la figura 2.5

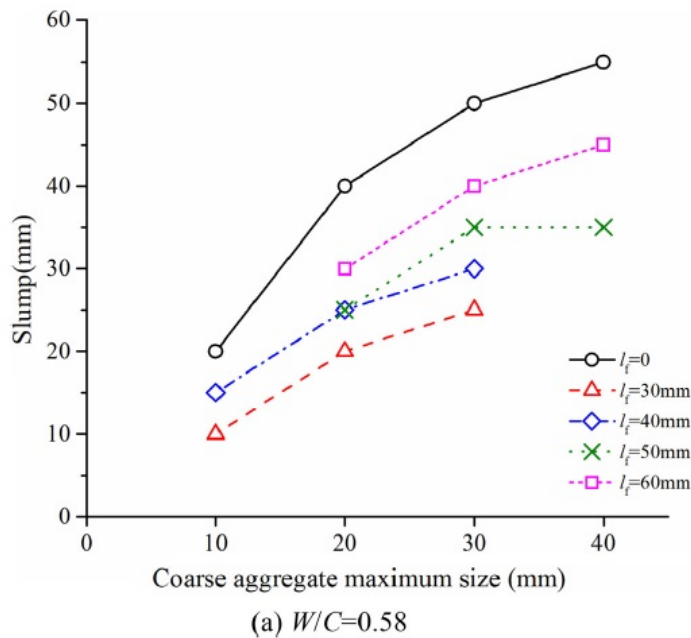


Figura 2.5: Efecto del largo de fibra y tamaño máximo de árido en la trabajabilidad del hormigón con fibras de acero. [6]

2.5. Variables principales en la respuesta dúctil del hormigón con fibras de acero

A partir de diferentes artículos y estudios que han abordado el comportamiento del hormigón con fibras de acero, se ha enfatizado en que existen ciertas variables que influyen en la respuesta del material de estudio. Dentro de estas variables se encuentran, principalmente, la dosis de fibras (V_f), el largo de la fibra, la relación de aspecto (largo/diámetro) y el número de anclaje [5]. A continuación se detalla el efecto de cada variable:

2.5.1. Largo de fibra, tamaño de árido y relación de aspecto

Con respecto al largo de fibra, y del mismo modo, a la relación de aspecto, es evidente que para un largo mayor el anclaje a la matriz de hormigón es más efectivo, sin embargo se debe tener en cuenta que, mientras mayor es el largo de la fibra, menor es el número de fibras por unidad de área (considerando una cuantía fija de acero) y, en efecto, la posibilidad de tener un estado de fibras uniformemente distribuidas se reduce producto de la aleatoriedad de encontrar fibras por sección del material [6].

Partiendo por el ensayo a compresión en probetas cúbicas (imagen 2.6), existe un leve aumento de resistencia al aumentar el tamaño máximo de árido (D_{max}) hasta los 30 mm donde posterior a eso la resistencia se ve un poco reducida. Por el contrario, para este ensayo el largo de fibra no modifica la respuesta mas que una diferencia entre el caso sin fibras y con fibras, logrando así, para el caso con fibras, un incremento de un 26 % de la resistencia a compresión. Esto se puede deber a que la fibra logra atravesar micro fisuras en la interfase del agregado grueso y el mortero, deteniendo de esta manera su propagación.

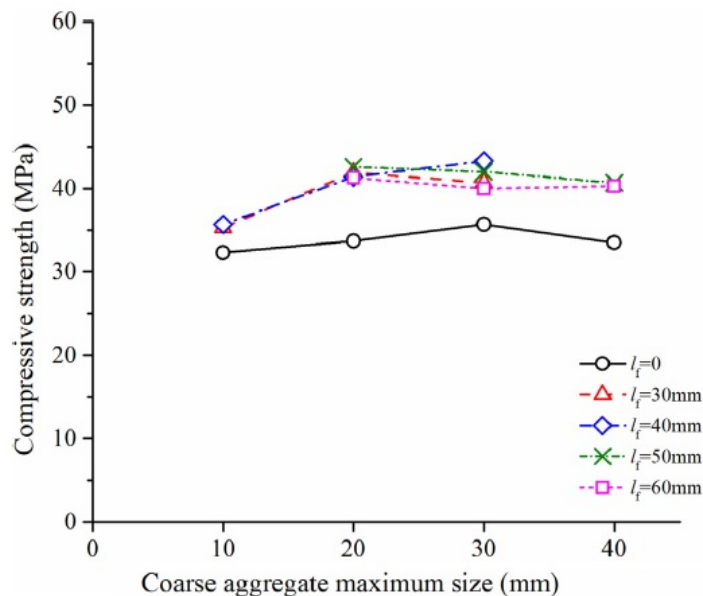


Figura 2.6: Ensayo a compresión para diferentes largos de fibras y tamaño máximo de árido [6]

Para el caso de resistencia a tracción por hendimiento (splitting tensile strength) se puede

ver a partir de la imagen 2.7 que al aumentar el largo de la fibra aumenta la resistencia a tracción, esto pues en la mayoría de los casos la fibra debería fallar por adherencia entre la fibra y la matriz y no por ruptura, por lo que al tener un mayor largo de fibra, la superficie de la fibra en contacto con la matriz de hormigón es mayor y, en efecto, la fuerza de roce que se debe vencer para poder extraer la fibra aumenta (mayor largo de empotramiento). Para el caso de la influencia del tamaño de árido, se observa que nuevamente hasta los 30 mm se obtiene un aumento en la resistencia, mientras que para un D_{max} de 40 mm el valor disminuye. Al aumentar el tamaño del árido grueso el área superficial total disminuye junto con la cantidad de mortero que lo envuelve, aumentando la cantidad de mortero que envuelve al acero y con ello la fuerza de unión en la interfaz fibra-matriz. Junto a lo anterior, se recomienda según el estudio realizado por Juhong Han, Mengmeng Zhao, Jingyu Chen y Xiaofang Lan (2019) [6] que la relación $\frac{l_f}{D_{max}}$ se encuentre en un rango de 1.25 a 3 para lograr resultados óptimos, ya que para valores mayores las fibras se empiezan a doblar en el proceso de mezclado y pierden eficiencia.

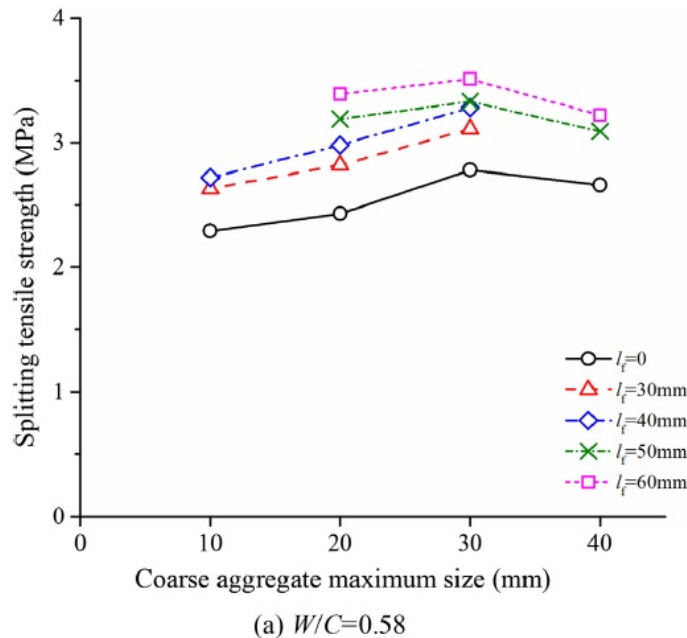


Figura 2.7: Ensayo a tracción por hendimiento para diferentes largos de fibras y tamaño máximo de árido [6]

El siguiente gráfico muestra el resultado de un ensayo a flexión 3PBT (de tres puntos) para una viga de 150 mm x 150 mm x 550 mm con fibras de acero cuyo número de extremo de gancho es 1 (tipo 3D), diámetro de 0.75 mm (para cada longitud), cuantía de un 1% y relación agua/cemento de 0.58, es decir, un hormigón de resistencia normal y con un diámetro máximo de árido de 20 mm para el caso de la imagen de la izquierda y de 30 mm para la imagen de la derecha.

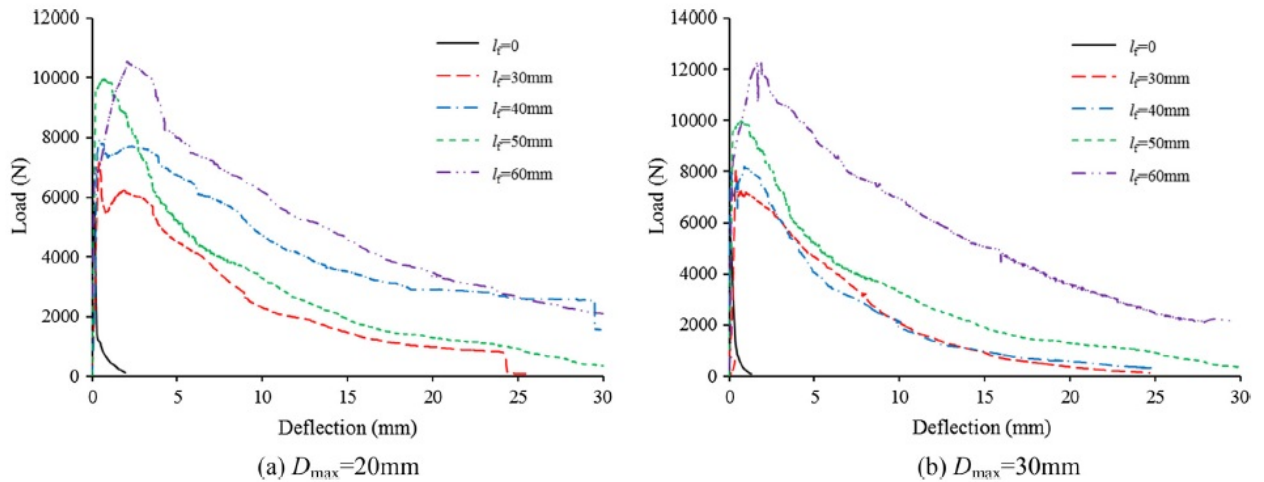


Figura 2.8: Ensayo a flexión 3PBT para diferentes largos de fibras [6]

Con lo anterior es posible notar la respuesta dependiente del largo de la fibra y que, claramente, para la respuesta a flexión, existe una deformación por endurecimiento que se logra gracias a las fibras, notando que el hormigón sin fibras casi no admite deformación y, en específico, su ruptura se obtiene de forma instantánea al iniciar su agrietamiento. De acuerdo al aumento en la longitud de la fibra, existe una mayor resistencia tanto en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}) como en su respuesta dúctil, adquiriendo una caída post agrietamiento cada vez más suave. Esto se debe a que las fibras son más largas, con lo que pueden soportar cargas mayores en las grietas y retrasar su formación y propagación.

Como complemento de lo anterior, los gráficos de las figuras 2.9 y 2.10 son resultados de ensayos a compresión y flexión respectivamente en donde se ensayaron probetas cúbicas y viguetas con fibras de acero con extremos de gancho, dos de ellas con largo de 30 mm y una de 35 cuyos diámetros corresponden a 0.5, 0.4 y 0.7 respectivamente. Con esto se estudió el efecto de la relación de aspecto para valores de 50, 60 y 67.

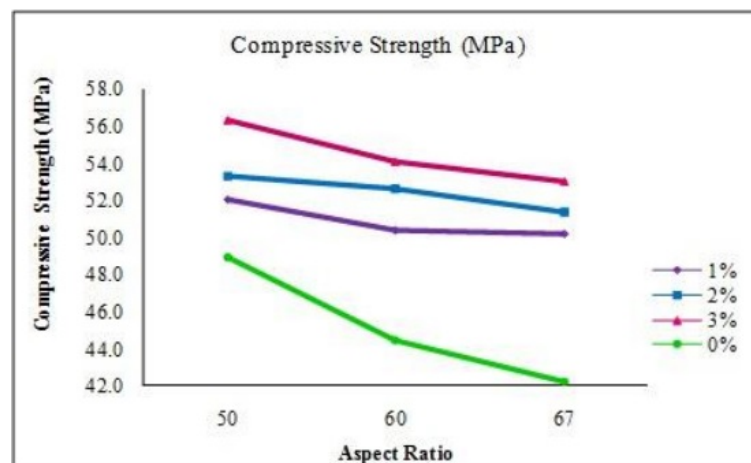


Figura 2.9: Ensayo a compresión en función de la relación de aspecto [13]

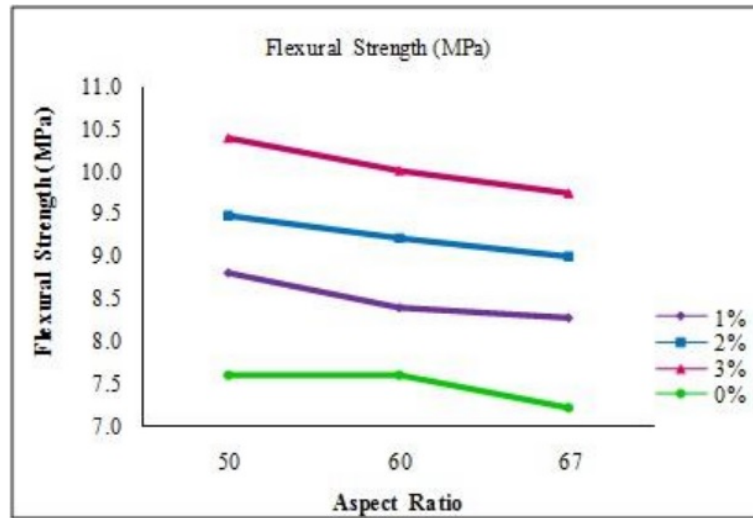


Figura 2.10: Ensayo a flexión en función de la relación de aspecto [13]

Con esta información se deducen dos cosas; primero, la relación de aspecto casi no modifica las propiedades mecánicas del material al variar el diámetro de la fibra (figuras 2.9 y 2.10) y segundo, fibras más largas permiten aumentar la resistencia residual a flexión, pero es más significativo el aumento en la dosis de fibras [5], tal como se verá en el punto 2.5.2. Por último, la probabilidad de adquirir una mezcla con distribución heterogénea de fibras aumenta junto a la relación l/d [9] por efecto de la reducción del número de fibras a mayores largos (manteniendo el valor V_f)

2.5.2. Dosis de fibra

El efecto de la dosis de fibra tiene un gran impacto en la respuesta dúctil, demostrando, con su aumento, un gran incremento en la resistencia residual, la cual se relaciona directamente con la contribución de la fibra para impedir la propagación de la grieta [4]. Sin embargo, se debe considerar, al momento de aumentar el volumen de fibras, el efecto en la trabajabilidad especificado en la sección 2.4, siendo entre 0% y 2% de fracción volumétrica los valores más estudiados por la literatura.

En la figura 2.11 se indican los resultados de un ensayo a flexión de tipo 4PBT realizado para viguetas de 150 mm x 150 mm x 600 mm, lo cual cumple con lo estandarizado por la ASTM C1609 que sugiere una geometría de sección 150 mm x 150 mm y largo entre 500 mm y 750 mm [11]. La longitud de fibra utilizada corresponde a 60 mm con un diámetro de 0.9 mm ($l_f/d_f = 65$). La figura siguiente muestra ensayos tanto para hormigón puro (imagen (a)) como para diferentes números de ganchos (imágenes b, c y d), variando en cada curva del gráfico la dosis de fibra entre 20, 40 y 60 kg/m^3 .

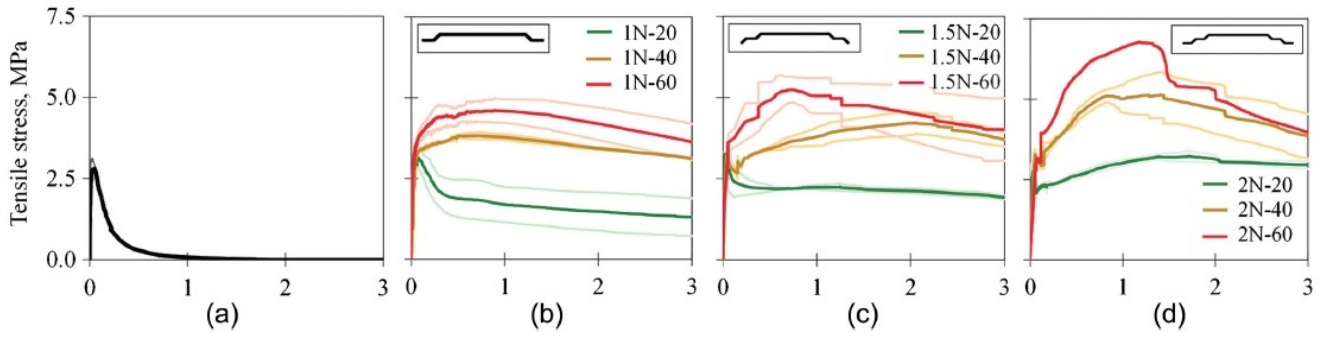


Figura 2.11: Ensayo a flexión 4PBT en viguetas para diferente número de gancho y volumen de fibras [4]

Respecto a la influencia del aumento en dosis de fibras, la vigueta sin fibras de acero falla instantáneamente al iniciar su agrietamiento sin capacidad dúctil, mientras que para valores de 40 y 60 kg/m^3 se obtuvo un endurecimiento por deformación para los tres tipos de fibra que se incrementó al aumentar su volumen (de 40 a 60) y, de forma menos drástica, al aumentar el número de gancho. Por otra parte, el límite de proporcionalidad no genera variación frente a cambios en la dosis de fibras ni en el número de gancho [4]. Esto se puede apreciar de mejor forma en la figura 2.12 donde una vigueta es ensayada a flexión mediante el ensayo 3PBT, con resistencia de 50 MPa, largo de fibra de 60 mm, relación de aspecto de 65 y dosis de 20, 35, 70 y 110 kg/m^3 , obteniendo valores f_L constantes para las diferentes dosis de fibra.

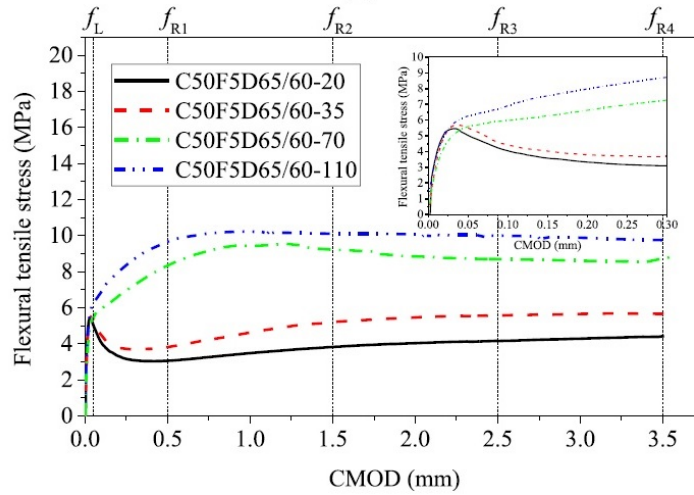


Figura 2.12: Ensayo a flexión 3PBT para diferentes dosis de fibras [5]

Para el caso de los ensayos a compresión el aumento de fibras no proporciona cambios significativos en la resistencia a compresión, sin embargo, el comportamiento post agrietamiento si logra una mejora dúctil al aumentar la dosis de fibra, generando una curva de deformación por ablandamiento más extendida (figura 2.13). A continuación se muestran las curvas resultantes de ensayos a compresión para dosis de fibras de 0% (PC), 1%, 1.6% y 3%.

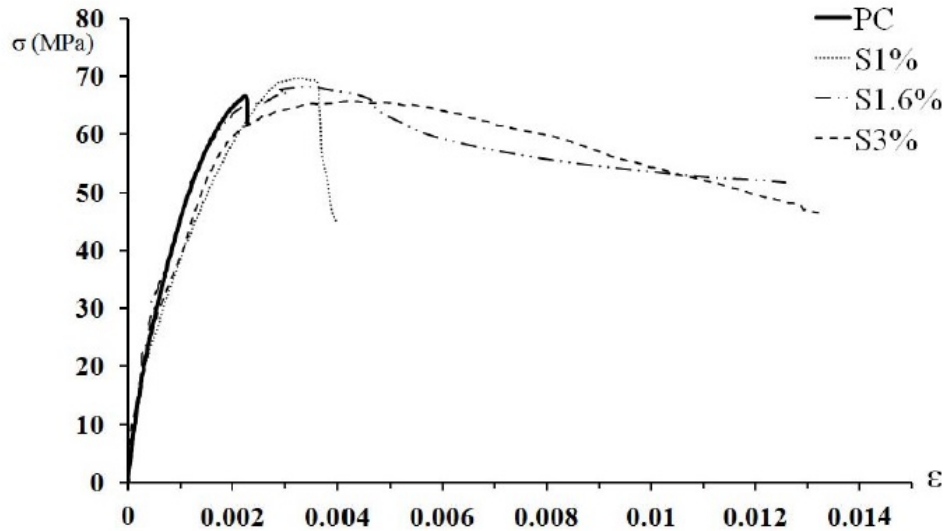


Figura 2.13: Ensayo a compresión para diferentes volúmenes de fibras [10]

Dado lo anterior, las propiedades mecánicas logradas por dosis adecuadas de fibras de acero sugieren que es posible su uso como material para elementos estructurales, en específico, cuando es requerida una respuesta dúctil [10].

2.5.3. Número de gancho

El número de gancho es otra variable que afecta la respuesta dúctil del hormigón con fibras de acero. Para las fibras con terminación en forma de gancho existen tres tipos como se indicaron en la sección 2.2 que generan, para un mayor número de gancho, un mayor anclaje de la fibra a la matriz de cemento.

Para explicar la influencia del número de gancho en el hormigón es necesario repasar la falla por extracción (pull-out failure), esta vez, de forma específica para el caso de fibras de acero con extremo de gancho. Este tipo de falla consiste en una resistencia inicial importante producto de las curvaturas del gancho que son inducidas a enderezarse debido a la tensión ejercida sobre ellas al momento del inicio del agrietamiento del hormigón. Una vez alcanzada la tensión necesaria para enderezar las curvaturas del gancho, la resistencia se reduce considerablemente puesto que la fibra deja de estar anclada a la matriz de hormigón y queda estirada en la zona recta del canal dejado por el espacio que ocupaba ésta misma, por lo que sólo le resta vencer la fuerza de roce entre el acero y el hormigón para ser completamente extraída de la matriz [7].

En la figura 2.14 se muestra la resistencia de una fibra anclada a la matriz de hormigón que es extraída de ella por tracción, este ensayo es denominado "pull-out" y revela la carga necesaria para extraer, tal como se explicó previamente, una fibra que se encuentra de forma perpendicular a la cara de la matriz en función del deslizamiento de la fibra. El ensayo fue realizado para un hormigón auto compactante con relación A/C de 0.45, tamaño máximo de árido de 10 mm y largo de fibra de 60 mm.

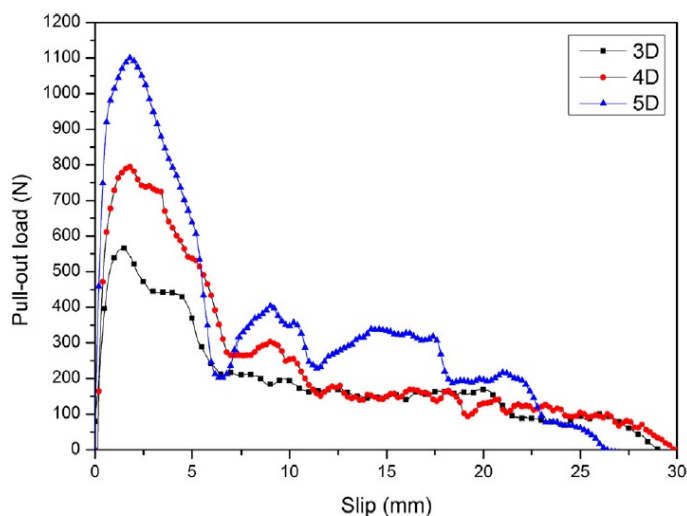


Figura 2.14: Ensayo "pull-out" para fibras 3D, 4D y 5D

A partir del gráfico anterior, se puede notar que para el caso de las fibras 5D la resistencia a la extracción es mayor que para las 3D y 4D, además, puede observarse para los tres tipos de fibras la resistencia por las curvaturas asociadas, obteniéndose para la fibra 5D cuatro peaks de resistencia producto de las cuatro curvaturas que posee su extremo de gancho [7].

Esto muestra de forma clara el aumento de adherencia de la fibra a la matriz, sin embargo, en la práctica las fibras no se encuentran todas orientadas en la dirección de la carga y la falla puede ocurrir por otros factores como, por ejemplo, la ruptura de la fibra. La imagen 2.11 de la sección 2.5.3 muestra el efecto del número de gancho para una viga con distribución aleatoria de las fibras, en donde los gráficos son bastante similares a excepción de las curvas correspondientes a la fibra 5D con dosis de 40 y 60 kg/m^3 las cuales logran una resistencia máxima considerable.

2.6. Efecto de la orientación y distribución de las fibras

La distribución y orientación de las fibras es una de las grandes problemáticas que posee el hormigón reforzado con fibras de acero puesto que, si bien, se han desarrollado algunos modelos matemáticos que predicen este comportamiento, estos no son del todo representativos y mucho menos precisos ya que existen muchas variables involucradas que alteran estos resultados. Con respecto a la distribución de las fibras en el hormigón, esta depende, entre algunos factores, de la forma en que se vierte el hormigón en el moldaje y el tiempo de vibración aplicado [17]. En la figura 2.15 se puede apreciar el efecto de la vibración y la longitud de las fibras en la distribución a lo largo de una probeta cilíndrica, donde las letras a, b, c y d representan la sección de la probeta desde la parte superior a la inferior respectivamente, mientras que las letras A, B, C y SCC representan diferentes mezclas de hormigón cuyos subíndices (0, 2 y 8) indican el tiempo en minutos de vibración. Por último, las fibras estudiadas son fibras de acero rectas de corte corto de 6 mm y fibras con extremo de gancho de 40 mm ((Dramix RC-65/40 hooked end fibers). Con esto, comparando el caso

de la mezcla A, resulta que al aumentar la vibración (A_0 , A_2 y A_8) el contenido de fibras aumenta en zonas inferiores de la probeta. Al mismo tiempo el largo de la fibra también aumenta la segregación dado que para el caso A_2 de fibras con longitud de 6 mm se tiene una distribución más homogénea a lo largo de la probeta que el caso de la mezcla A_2 con fibras de 40 mm (mismo tiempo de vibrado pero diferente longitud de fibra) [17].

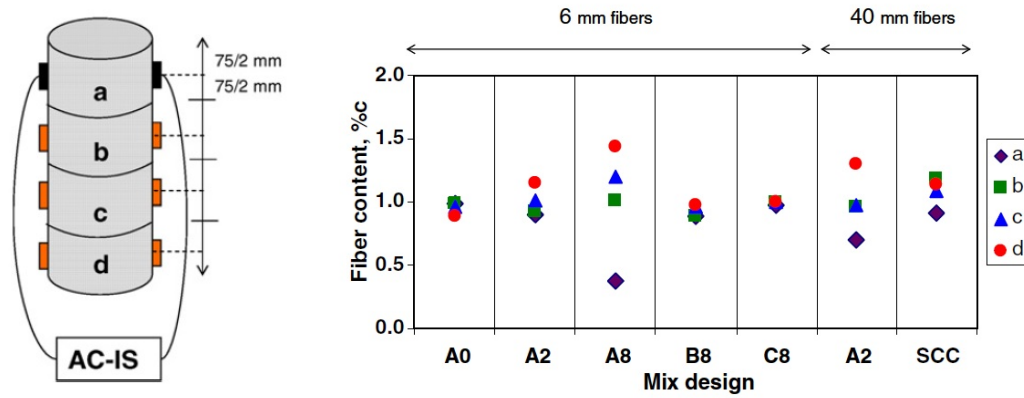


Figura 2.15: Distribución de fibras en una probeta cilíndrica [17]

Además de lo anterior, existen las variables de las propiedades reológicas de la mezcla y las condiciones de contorno ("wall-effect") producidas por el moldaje [18]. La figura 2.16 muestra tres diferentes condiciones de contorno que afectan la orientación de las fibras, para el caso (a) en que no existen bordes cercanos a las fibras, estas presentan una orientación aleatoria y no existe ninguna tendencia a direccionarse de alguna forma específica, este caso se cumple en la zona de al medio de vigas o viguetas, por ejemplo. Para el caso (b) se muestra una situación en la que existe un borde superior e inferior y que inducen una orientación determinada para las fibras que se encuentran cercanas a los bordes, obligándolas a direccionarse de forma paralela a este. Así mismo, el caso (c) muestra una situación en que las fibras se encuentran rodeadas por una mayor cantidad de bordes, por lo cual se tiene una menor aleatoriedad en la orientación y distribución de las fibras. De todas formas, el caso (b) resulta ser beneficioso para elementos resistentes a flexión debido a que la orientación paralela a la cara inferior del elemento permite que la fibra trabaje de forma más efectiva para resistir la tensión. Por otra parte, la aleatoriedad direccional de fibras presentada en el caso (a) permite que en zonas centrales del elemento se logre una mayor resistencia al corte. [21]

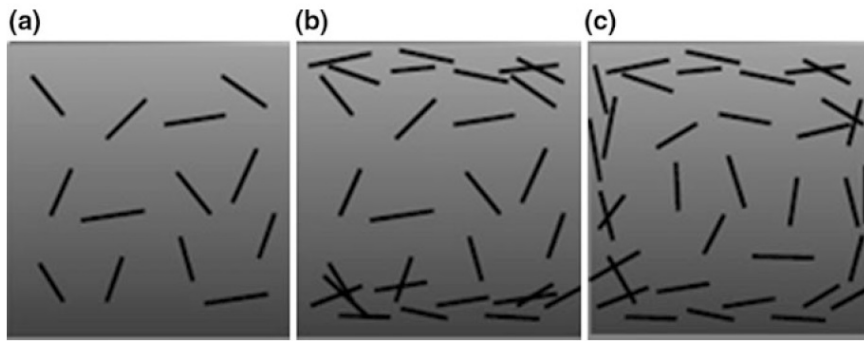


Figura 2.16: Condiciones de contorno [21]

De acuerdo al desempeño mecánico, la respuesta dúctil puede verse gravemente afectada frente a una mala dispersión, resultando así zonas con bajo refuerzo y por ende más propensas a fallar. Es por esto que una distribución uniforme reduce las zonas con escasez de fibras (zonas de riesgo de falla) y maximiza la eficiencia del refuerzo [17].

Capítulo 3

Metodología Experimental

Para poder conocer las propiedades del material y, junto a esto, realizar la caracterización, es necesario desarrollar tres tipos de ensayos: tracción, compresión y flexión. Los primeros dos se realizarán para probetas cilíndricas mientras que la respuesta a flexión se estudiará en viguetas con una carga puntual ejerciendo presión en la mitad de su luz. En la siguiente subsección se muestran los materiales que requeridos para llevar a cabo los ensayos y construcción de los elementos mencionados.

3.1. Materiales

Dentro de los materiales a utilizar se encuentran los directamente relacionados con la confección del hormigón (mezcla) y los materiales requeridos en laboratorio, tanto para la realización de los ensayos como para la confección de las probetas. A continuación, se especifica lo que se espera utilizar para el desarrollo de la parte experimental de esta memoria.

Materiales para la mezcla de hormigón con fibras de acero:

- Árido
 1. Arena (fina y gruesa)
 2. Gravilla
- Fibras de acero
- Cemento Puzolánico (grado corriente)
- Agua
- Aditivo plastificante

Materiales de Laboratorio y otros:

- Tubos de PVC (molde de las probetas cilíndricas)
- Tapas de PVC (110 mm)
- Silicona

- Desmoldante
- Pesa
- Mezclador
- Balde
- Máquina universal
- Moldaje prismático y de acero (viguetas)

3.1.1. Fibra de Acero

La fibra estudiada en el presente informe corresponde a fibra de acero Dramix 5D 65/60 BG, donde la longitud de fibra es de 60 mm, el diámetro de 0,9 mm y, con esto, su relación de aspecto (largo/diámetro) es de 65. Esta fibra cuenta con anclajes en los extremos los cuales fueron doblados 4 veces (tal como aparece en la figura 2.1) para proveer una mayor adherencia a la matriz de hormigón . Por último, las fibras son de acero brillante y que fueron sometidas al proceso de trefilado en frío. A continuación se indican otras propiedades importantes a considerar.

Tabla 3.1: Propiedades de la fibra de acero Dramix 5D 65/60 BG

Largo [mm]	Diámetro [mm]	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de Yong [MPa]	Densidad [Kg/m ³]
60	0,9	2300	210000	7850

3.2. Granulometría

Primero que todo, es necesario caracterizar el material de árido a utilizar en la confección de las probetas, de forma de conocer bien datos como el tamaño máximo de partícula y la graduación de cada árido por separado. Para lograr esto, se requiere de una muestra representativa la cual se obtiene implementando el método del cuarteado. Este método se realiza para tanto para la arena fina como la gruesa de forma individual y consiste en acumular todo el árido sobre una superficie limpia donde se procede a mezclar hasta finalmente formar un cono invertido sobre la superficie. Posteriormente se debe dibujar una cruz encima del montón de arena para luego guardar los extremos opuestos de la cruz en los contenedores donde se dejará el árido. Este procedimiento se repite nuevamente y de forma iterativa con los otros dos extremos de la cruz no guardados, formando nuevamente con ellos un cono invertido , marcando la cruz y guardando en el mismo contenedor los nuevos extremos opuestos. Finalmente, alcanzada una porción pequeña de árido, denominada como la muestra representativa, se finaliza el cuarteado y se prosigue a realizar el secado de la muestra y con eso, poder empezar con la granulometría. A continuación se muestra de forma visual el método del cuarteado:



Figura 3.1: Cuarteado

Para el secado y estudio de muestras se siguió lo estipulado por la norma ASTM C-136, dejando la muestra representativa de cada árido en un horno a una temperatura uniforme de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Transcurrido el tiempo indicado, los resultados del secado de muestra, que serán útiles más adelante para definir la dosificación de agua en el hormigón, fueron los siguientes:

Tabla 3.2: Porcentaje de humedad arena fina

Arena fina	Muestra 1 [g]	Muestra 2 [g]	Muestra 3 [g]
peso humedo	621	750	828
peso seco	592	714	788
humedad [%]	4,7	4,8	4,8
		Humedad Promedio [%]	4,8

Tabla 3.3: Porcentaje de humedad arena gruesa

Arena Gruesa	Muestra 1 [g]	Muestra 2 [g]	Muestra 3 [g]
peso humedo	1092	1154	1136
peso seco	1044	1101	1086
humedad [%]	4,4	4,6	4,4
		Humedad Promedio [%]	4,5



Figura 3.2: secado de muestras

Una vez secada la muestra en el horno, se debe cumplir con lo indicado en la norma ASTM C-136, exigiendo un mínimo de 300 gramos para árido fino y 5Kg para el árido grueso (dependiente del tamaño máximo de partícula). De esta forma, los materiales a utilizar son los siguientes:

- 500g Arena fina
- 500g Arena gruesa
- 5Kg Gravilla
- Pesa
- Juego de tamices
- Brocha y cepillo de alambre

Con esto, los siguientes pasos a seguir en la granulometría, ya realizado el cuarteado de la muestra representativa y el secado de muestra, son:

1. Apilar los tamices uno encima de otro de forma que los tamices con abertura de mayor tamaño vayan arriba de los con menor tamaño, dejando al final el depósito receptor.
2. Colocar la muestra e ir probando los tamices en orden de mayor a menor apertura hasta llegar al primer tamiz cuya partícula de mayor tamaño quede retenida en la malla. Sobre esta malla se coloca la muestra representativa del árido estudiado.
3. Agitar la columna de tamices hasta que no haya más partículas que puedan atravesar la malla superior.

4. Retirar el tamiz superior, pesar el contenido retenido y dejar registrado su valor, esto incluyendo las partículas atascadas en la malla que se desprenden utilizando el cepillo con alambre para limpiar todas las mallas excepto la 100 y 200 donde se usa la brocha en lugar del cepillo.
5. Repetir los pasos 3 y 4 para los siguientes tamices hasta llegar al depósito receptor, al cual también se pesa su contenido.

Lo anterior se debe realizar por separado para los tres tipos de áridos involucrados, es decir, para la arena fina, arena gruesa y gravilla, repitiendo el proceso hasta lograr un porcentaje bajo de pérdida del material, es decir, que la masa de la muestra representativa sea casi similar a la suma de la masa retenida en cada malla (lo cual se logró con una diferencia máxima de un 1,5 %).

A continuación se muestran los tamices con sus respectivos tamaños de apertura seguido de los resultados del análisis granulométrico de cada árido.

Tabla 3.4: Número de tamiz y tamaño de apertura

Tamiz Nº	Diámetro [mm]
3/4"	19,0
1/2"	12,5
3/8"	9,5
#4	4,75
#8	2,36
#10	2,00
#30	0,600
#40	0,425
#50	0,300
#100	0,150
#200	0,075

Tabla 3.5: Granulometría arena fina

Arena Fina (500gr de muestra)				
Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Pasa
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	15	3 %	97 %
#8	2,36	12	5 %	95 %
#10	2,00	3	6 %	94 %
#30	0,600	12	9 %	91 %
#40	0,425	11	11 %	89 %
#50	0,300	29	17 %	83 %
#100	0,150	202	58 %	42 %
#200	0,075	162	90 %	10 %
Fondo	-	47	100 %	0 %

Tabla 3.6: Granulometría arena gruesa

Arena Gruesa (500gr de muestra)				
Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Pasa
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 3.7: Granulometría gravilla

Gravilla (19mm ->5kg de muestra)				
Tamiz N°	Diámetro [mm]	Pesos [g]	% Retenido	% Pasa
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 %	1 %
#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 %

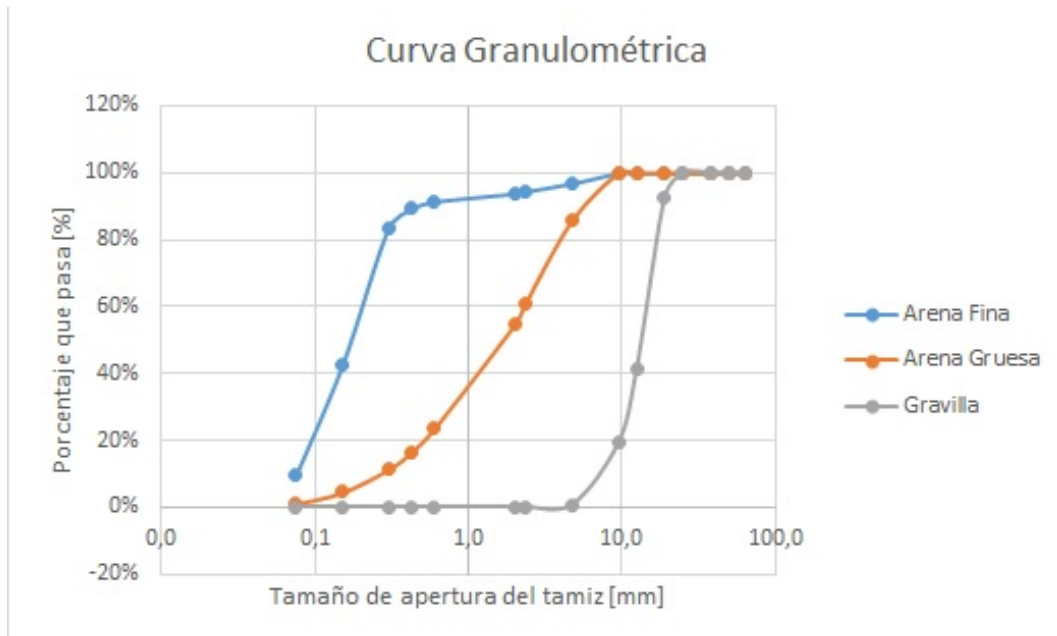


Figura 3.3: Curva granulométrica



Figura 3.4: Granulometría

3.3. Probetas

Las Mezclas a usar para la elaboración de las probetas contienen partículas cuyo tamaño máximo corresponde a 19 mm para el caso de la mezcla 1 (M1) la cual incluye gravilla, mientras que para el caso de la mezcla 2 (M2) no se utiliza este material, teniendo así un tamaño máximo menor y del orden de los 4,75 mm.

La cantidad de agua a considerar en cada mezcla se determinó incluyendo el porcentaje de humedad (tabla 3.2 y 3.3) que contenía la arena (fina y gruesa), de esta forma, las dosis de agua indicadas en la tabla 3.8, tanto para la mezcla 1 como para la 2, corresponden a las cantidades que no incluyen el agua contenida por las arenas, sin embargo al momento de realizar las mezclas si se tomó en cuenta el efecto de la humedad, reduciendo las cantidades mostradas en la tabla 3.8 según correspondiera de acuerdo a los cálculos.

Respecto a la relación Agua/Cemento (A/C) utilizada para lograr una buena trabajabilidad, se tiene que el valor para la mezcla M1 fue de 0.51, añadiendo además una dosis de plastificante de $2.75 L/m^3$, mientras que para el caso de la mezcla M2, cuya trabajabilidad se vio bastante reducida, se requirió de una mayor cantidad de agua, modificando esta relación en 0.62 y una cantidad de $3.66 L/m^3$ de plastificante. En la siguiente tabla se pueden ver las cantidades específicas a utilizar para cada mezcla y cada material.

Tabla 3.8: Dosificaciones

Dosificaciones						
Mezcla	Cemento [kg/m ³]	Agua [kg/m ³]	Gravilla [kg/m ³]	Arena Gruesa [kg/m ³]	Arena Fina [kg/m ³]	A/C
M1	796	405,9	980	637	477	0,51
M2	796	493,5	-	1197	898	0,62

Respecto a la cantidad de elementos a ensayar, se confeccionarán 6 probetas cilíndricas por cada mezcla y por cada volumen de acero (0 %, 0.5 % y 1 %), de las cuales dos son destinadas para ensayos a compresión, dos a tracción y las últimas dos quedarían de reserva en caso de que suceda cualquier imprevisto con alguna de las otras cuatro. Con esto, el resultado total del número de probetas cilíndricas es de 36. Por otra parte, se realizarán dos viguetas por cada mezcla y por cada volumen de acero considerando las dosificaciones de 0 %, 0.5 % y 1 %, dando un total de 12 viguetas.

De acuerdo a las dimensiones, tal como se indica en la tabla 3.11, los tubos de PVC a usar para el moldaje de las probetas cilíndricas tendrán un diámetro interno de 105 mm, externo de 110 mm y altura de 210 mm. Para las viguetas la sección será de 150x150x600 mm (ancho, alto, largo).

Tabla 3.9: Número de probetas cilíndricas confeccionadas.

Probetas Cilíndricas			
Volumen de Fibra	M1	M2	Total
0 %	6	6	12
0.5 %	6	6	12
1 %	6	6	12
			Total
			36

Tabla 3.10: Número de viguetas confeccionadas.

Viguetas			
Volumen de Fibra	M1	M2	Total
0 %	2	2	4
0.5 %	2	2	4
1 %	2	2	4
			Total
			12

Tabla 3.11: Dimensiones de las probetas

Dimensiones			
Probeta	Ancho/Diámetro [mm]	Alto [mm]	Largo [mm]
Cilíndrica	105	210	-
Vigueta	150	150	600

3.3.1. Confección de Probetas Cilíndricas

El primer paso para obtener las probetas cilíndricas es construir los moldajes, para esto se cortaron tubos de PVC de 110 mm de diámetro y 210 mm de alto a los cuales se les pegaron tapas del mismo material, siendo sellados con silicona para evitar el escurrimiento y pérdida de agua proveniente de la mezcla de hormigón.

Ya listos los moldajes cilíndricos, se procede a hormigonar. Para esto se sigue el siguiente orden:

- Se parte pesando cada material por separado (cemento, gravilla, arena fina y arena gruesa) en la balanza y se junta en un recipiente para mezclar ahí mismo el cemento con el árido. El agua se pesa aparte en un pequeño bidón donde se agrega y revuelve el plastificante.
- Se vierte paulatinamente dentro de un balde el cemento con el árido, añadiendo agua cada vez que la mezcla lo requiera, mientras esta es revuelta con el mezclador de la figura 3.5.a. Es importante verificar que en ningún borde haya material acumulado sin mezclarse.
- En caso de realizar una mezcla con fibras, se vierten después del paso anterior, una vez lista la mezcla de cemento, agua y árido. Las fibras son esparcidas de forma lenta mientras el mezclador las revuelve y dispersa, de forma que no se formen erizos de fibras.
- Finalizada la mezcla con (o sin) fibras, se vierte el material sobre los moldajes cilíndricos indicados en la figura 3.5.b, procurando llenarlos de a tercios para poder realizar la vibración del hormigón de manera que suba a la superficie el aire encerrado y permitir un mejor amoldamiento del hormigón en todo el volumen del moldaje. Esto se logra introduciendo de forma vertical en la mezcla una barra de acero delgada, repitiendo el movimiento ascendente y descendente 25 veces. Luego se golpea el moldaje por afuera 25 veces nuevamente y en tandas de a 5 golpes girando el molde cilíndrico con el fin de vibrar de forma homogénea en toda la superficie. Finalmente, rellenando el siguiente tercio del volumen del molde se repite el mismo procedimiento de vibración, hasta llegar al último tercio donde se alisa la superficie, quitando el material sobrante y se sella la probeta colocando alusa plast sobre la cara expuesta para evitar la pérdida de agua durante el fraguado.
- Por último, las probetas se marcan para diferenciar el tipo de mezcla, la dosis de acero y el día en el que se confeccionaron para poder registrar, como mínimo, los 28 días que se deben dejar fraguando antes de someterlas a los ensayos de tracción y compresión.



(a) Mezclador

(b) Molde
cilíndrico

Figura 3.5

3.3.2. Confección de Viguetas

Para el caso de las viguetas, estas se efectúan de forma análoga a las probetas cilíndricas, sin embargo, dadas las dimensiones que involucra su producción, el hormigón debe fabricarse en un recipiente de mayor volumen y los moldajes utilizados corresponden a moldajes prismáticos de metal y de plástico, siendo usados 6 de plástico y 6 metálicos (figura 3.6). La leve diferencia en longitud de cada moldaje es irrelevante para los resultados del ensayo debido a que lo que importa es la distancia entre apoyos, lo que sobre desde el apoyo hacia cada término de la vigueta no contribuye a la resistencia. Por otra parte, es necesario cubrir con una capa de desmoldante (topex desmol metal) cada moldaje prismático para facilitar el desmolde de la vigueta. El proceso de vibración se realizó de la misma forma que para las probetas cilíndricas con la diferencia de que la cantidad realizada por una probeta se realizó en este caso para la mitad de una vigueta, repitiendo la misma cantidad para la otra mitad, es decir 25 vibraciones verticales por cada mitad y 25 vibraciones laterales (golpeando horizontalmente el moldaje) por cada mitad. Finalmente, durante los días de semana fueron regadas cada vigueta por la superficie de forma de evitar el agrietamiento producto de la reacción exotérmica del cemento con el agua.



Figura 3.6: Moldes Prismáticos

3.4. Ensayos

3.4.1. Ensayos a Tracción

Los ensayos a tracción se realizaron para las probetas cilíndricas, usando dos de cada mezcla (M1 y M2) y para cada dosificación (0%, 0.5% y 1%), dando un total de 12 probetas cilíndricas a ensayar a tracción en la máquina universal Instron® modelo 600LX. La metodología de los ensayos, transcurridos más de 28 días de fraguado, empieza con dejar pegado cada extremo de la probeta a dos platillos cilíndricos (base y tope de la probeta). Esto se realiza picando en cada cara con un desatornillador de tipo paleta, golpeándolo de forma cuidadosa con un martillo (para no generar fisuras internas en el material) formando así pequeños agujeros en la superficie lisa de cada cara que permiten una mejor adherencia del epóxico a la cara de la probeta. Luego de esto se mezcla en igual cantidad las dos sustancias del adhesivo epóxico Sikadur®-31 HMG y se coloca una cantidad adecuada en cada cara de la probeta para evitar una falla por adherencia del epóxico, de esta forma la parte más plana de la probeta (donde tenía contacto con la tapa de pvc del moldaje) es pegada al platillo rellenando tanto la cara como los bordes con el adhesivo mencionado. Luego, se agrega adhesivo de la misma forma, pero esta vez para la cara superior. Seguido de esto se sitúan 3 varillas de forma equidistante en los bordes de la placa metálica basal con el propósito de poder alinear en altura ambos platillos cilíndricos. Finalmente se esparce el adhesivo por los bordes de cada cara de la probeta dejando un filete de al menos un centímetro.

Tras un día en que se deja endurecer el adhesivo se procede a montar la probeta en la máquina, para esto se retiran las varillas y se atornillan las placas a la máquina siendo la placa superior anclada a otra placa que posee una rotula, permitiendo de esta forma el libre acomodamiento de la placa al momento de ser traccionada y evitar inducir tensión torsional en el elemento. Por último, se instalan dos sensores LVDT de forma vertical a los lados de la probeta separados por 180°, los cuales se sujetan mediante un bloque pequeño de madera que es pegado a la probeta usando loctite super bonder. A su vez, el core, que corresponde a una pequeña varilla que marca la deformación unitaria al moverse por el sensor, es limitado por otra placa horizontal de madera pegada con el mismo adhesivo en la parte inferior de la probeta. El montaje de la probeta a las placas cilíndricas y de los sensores se ve en las siguientes imágenes:



Figura 3.7: Montaje de ensayo a tracción

Antes de partir con el ensayo y una vez preparado el montaje, se induce un pretensado del orden de los 30-50 Kg con el fin de poder acomodar los hilos entre los platillos adheridas a la probeta y los anclados a la máquina, esto evita que se generen deformaciones a carga constante al inicio de la zona elástica y reduce considerablemente el tiempo de ensayo sin afectar los resultados. Luego de esto, se verifica el correcto funcionamiento de los sensores LVDT moviendo el core para finalmente dar inicio al ensayo de tracción, cuyo mecanismo es inducir carga bajo un aumento constante de deformación, la cual fue fijada en 0.5 mm/min, y cuyo término de medición se generaba de forma automática para una carga igual al 20 % de la resistencia máxima alcanzada.

3.4.2. Ensayos a Compresión

Los ensayos a compresión se realizaron para las mismas mezclas y dosificaciones usadas a tracción, esto es, dos probetas por cada mezcla (M1 y M2) y por cada dosificación (0 %, 0.5 % y 1 %), dando nuevamente un total de 12 probetas. Es importante que cada probeta sea rectificada ya que, al ser comprimidas por superficies planas, la probeta también requiere esta superficie para permitir distribuir de forma homogénea la carga de la máquina a la probeta. El rectificado fue realizado por IDIEM donde cada cara (superior e inferior) fue cortada mediante herramientas especiales. El resultado del rectificado se muestra a continuación:



Figura 3.8: Rectificado de probetas cilíndricas

El montaje de la probeta para ser ensayada consiste en, por medio de una superficie completamente plana y nivelada, instalar un sistema compuesto por dos anillos separados en altura mediante tres pasadores que mantienen ambos anillos equidistantes en altura y sujetando los sensores LVDT con una distancia de 180° entre ellos (figura 3.9). Con esto, para asegurar una correcta instalación, se tienen tres tornillos en ambos anillos que deben atornillarse de forma equidistante entre la superficie de la probeta, la cual va al centro de los anillos.

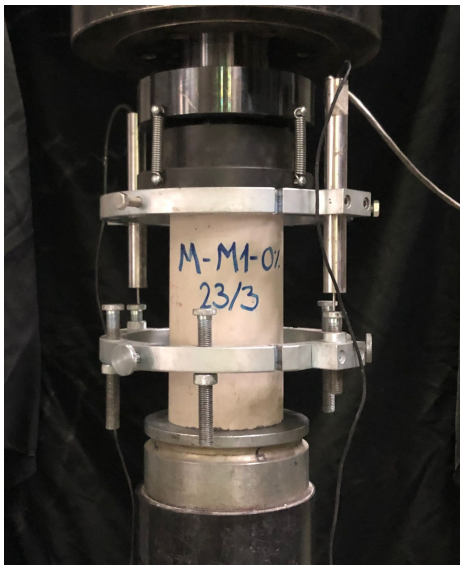


Figura 3.9: Montaje de ensayo a compresión

Una vez posicionada la probeta en la máquina universal se realiza el pretensado, de forma análoga a los ensayos a tracción, cargando la probeta con una compresión inicial de 50 Kg para permitir el reacomodo de las placas de la máquina a las caras de la probeta. Finalmente, se inicia el ensayo a compresión usando una configuración de deformación a 0.3 mm/ min y término del muestreo al 20 % de la carga máxima.

3.4.3. Ensayos a flexión

El montaje para ensayar las viguetas se logró por medio de dos placas metálicas rectangulares ancladas a la máquina universal, una posicionada por encima de donde iría colocada la vigueta y la otra por abajo. Las dimensiones de estas placas permiten incluso ajustar las distancias tanto de los apoyos como del (o los) punto (s) de carga ya que son piezas atornillables para diferentes separaciones entre apoyos. Para poder obtener datos confiables se montan dos sensores LVDT al igual que en los ensayos anteriores, ubicados a cada lado de la vigueta (en la parte central) y sosteniéndose por un soporte magnético a las columnas de la máquina. En la figura 3.10 se muestra el sistema descrito. La velocidad de desplazamiento utilizada se dejó al mismo valor que para tracción de 0.3 mm/min y con un registro que finaliza al 80 % de degradación de la carga máxima o hasta alcanzar una deflexión de 10mm.



Figura 3.10: Montaje ensayo a flexión de 3 puntos

De acuerdo con el ensayo a flexión realizado, este corresponde al de flexión de tres puntos o también conocido por sus siglas en inglés como "three-point bending tests (3PBT)". La configuración de este tipo de ensayos consta de dos apoyos inferiores y un punto de carga por la parte superior y a una distancia equidistante de ambos apoyos. Esta distancia fue fijada en 400mm ya que las dimensiones de las viguetas contaban con un largo de 600 mm y algunas de 530 mm (dependiendo del moldaje utilizado). Con esto, la diferencia en longitud de las viguetas producto del uso de diferentes moldajes no influye en los resultados del ensayo ya que la resistencia a la carga y la distribución de tensiones se genera en la zona entre apoyos. Por otra parte, el excedente de 100 mm por lado no alcanza a generar una carga por peso propio que pudiese inducir un momento negativo.

3.4.4. Resumen de probetas fabricadas

A continuación se muestra el registro del tiempo de fraguado para cada probeta ensayada, indicando además datos como la fecha de elaboración y la fecha y tipo de ensayo. La nomenclatura utilizada indica la mezcla (M1 o M2), luego la dosificación de la probeta (0%, 0.5% y 1%) y por último se señala el número de la probeta del lote respectivo (versión v1, v2, v3, v4, v5 y v6). Así la probeta M1-0.5% v2 corresponde a la segunda probeta ensayada (versión 2) del lote de mezcla 1 cuya dosificación de acero es de 0.5%.

Por otra parte, todas las probetas a tracción cuentan con más de 45 días de fraguado, a compresión cuentan con más de 85 y para las viguetas a flexión son más de 100 días, permitiendo, de esta forma, que la diferencia en resistencia sea despreciable para el caso de probetas con mayor tiempo de fraguado (imagen de la resistencia en función de la edad del hormigón mostrada en el anexo 1). En las siguientes tablas se muestra el fraguado para los ensayos de las probetas cilíndricas y viguetas, incluyendo también las versiones que no se consideraron (marcadas en rojo) debido a resultados incongruentes, ya sea por agrietamiento temprano del material, falla por adherencia a las placas (en el epóxico), mala lectura de los sensores en el rango elástico o respuestas que requirieron de un tercer ensayo para confirmar la tendencia de falla (dúctil o frágil).

Tabla 3.12: Tiempo de fraguado probetas cilíndricas a tracción

TRACCIÓN				
Probeta	Fecha elaboración	Fecha de ensayo	Tiempo de fraguado	Ensayo
M1-0% v1	22-03-2022	12-05-2022	51	Tracción
M1-0% v2	22-03-2022	12-05-2022	51	Tracción
M2-0% v1	28-03-2022	12-05-2022	45	Tracción
M2-0% v2	28-03-2022	12-05-2022	45	Tracción
M1-0% v3	23-03-2022	16-05-2022	54	Tracción
M2-0% v3	28-03-2022	18-05-2022	51	Tracción
M1-1% v1	25-03-2022	20-05-2022	56	Tracción
M1-1% v2	25-03-2022	20-05-2022	56	Tracción
M2-0.5% v1	28-03-2022	20-05-2022	53	Tracción
M2-0.5% v2	28-03-2022	20-05-2022	53	Tracción
M2-1% v1	28-03-2022	30-05-2022	63	Tracción
M2-1% v2	28-03-2022	30-05-2022	63	Tracción
M1-0.5% v1	28-03-2022	30-05-2022	63	Tracción
M1-0.5% v2	28-03-2022	30-05-2022	63	Tracción
M2-1% v5	28-03-2022	24-06-2022	88	Tracción
M1-0.5% v4	29-03-2022	24-06-2022	87	Tracción
M2-1% v6	29-03-2022	05-08-2022	129	Tracción
M2-0.5% v5	28-03-2022	05-08-2022	130	Tracción
M1-0% v6	22-03-2022	05-08-2022	136	Tracción

Tabla 3.13: Tiempo de fraguado probetas cilíndricas a compresión

COMPRESIÓN				
Probeta	Fecha elaboración	Fecha de ensayo	Tiempo de fraguado	Ensayo
M1-0 % v4	23-03-2022	16-06-2022	85	Compresión
M1-0 % v5	23-03-2022	16-06-2022	85	Compresión
M1-1 % v3	25-03-2022	22-06-2022	89	Compresión
M1-1 % v4	25-03-2022	22-06-2022	89	Compresión
M2-1 % v3	28-03-2022	23-06-2022	87	Compresión
M2-1 % v4	29-03-2022	23-06-2022	86	Compresión
M1-0.5 % v3	28-03-2022	23-06-2022	87	Compresión
M2-0.5 % v3	28-03-2022	23-06-2022	87	Compresión
M2-0 % v4	28-03-2022	14-07-2022	108	Compresión
M2-0 % v5	28-03-2022	14-07-2022	108	Compresión
M1-0.5 % v5	28-03-2022	14-07-2022	108	Compresión
M2-0.5 % v4	29-03-2022	14-07-2022	107	Compresión
M1-0 % v7	06-04-2022	26-08-2022	142	Compresión

Tabla 3.14: Tiempo de fraguado viguetas

FLEXIÓN				
Probeta	Fecha elaboración	Fecha de ensayo	Tiempo de fraguado	Ensayo
M2-0 % v1	07-05-2022	19-08-2022	104	Flexión
M1-0 % v1	06-05-2022	22-08-2022	108	Flexión
M1-0 % v2	06-05-2022	22-08-2022	108	Flexión
M2-0 % v2	09-05-2022	22-08-2022	105	Flexión
M1-1 % v1	12-05-2022	22-08-2022	102	Flexión
M1-1 % v2	12-05-2022	22-08-2022	102	Flexión
M2-1 % v1	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión
M2-1 % v2	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión
M1-0.5 % v1	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión
M1-0.5 % v2	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión
M2-0.5 % v1	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión
M2-0.5 % v2	10-05-2022	23-08-2022	105	Flexión

Capítulo 4

Resultados y Análisis

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a tracción, compresión y flexión en viguetas junto con sus respectivos análisis, comparando y mostrando de forma visual los gráficos logrados para facilitar el estudio de cada comportamiento y respuesta. Además de esto, se indica la forma en que se manipularon los datos provenientes tanto de los sensores utilizados como de la máquina de ensayos.

4.1. Ensayos a Tracción

Tal como se mencionó en el capítulo 3.4.1 la medición del registro de deformación vs esfuerzo se realizó por medio de dos sensores colocados a cada lado de la probeta (separados por 180°) y, de forma paralela, se obtuvo la medición de la máquina. El objetivo de los sensores, al tener una mayor precisión que la lectura de la máquina, es poder medir el rango elástico y las pequeñas deformaciones involucradas en esta de forma más precisa, incluyendo así las lecturas producidas por la acomodación inicial de la probeta y de los hilos de los platillos cilíndricos de la máquina. Por otra parte, el funcionamiento de los sensores pierde eficiencia para la zona de post fisuración debido a que la grieta puede originarse y propagarse fuera del rango de lectura de los sensores LVDT, esto es, entre la caja rectangular y la placa de madera (figura 3.7). Es por lo anterior que, una forma de representar lo mejor posible la deformación de la probeta es utilizando la lectura de los sensores para el rango elástico y la lectura de la máquina para el rango plástico. Para las lecturas de la deformación última ($\varepsilon_{ut[80\%]}$) y la energía post fisuración indicadas en la tabla 4.1 es importante especificar que esta deformación está definida para el 80% de degradación de la tensión máxima (f'_t). Este valor fue definido ya que permite comparar de forma correcta resultados entre diferentes tipos de fibras, provenientes de los ensayos realizados en las memorias de Felipe Concha, Andrés Peralta y Marcela Herrera, en donde todos los ensayos lograron alcanzar el 80% de degradación. Con ello, los resultados obtenidos para las dos mezclas estudiadas y las tres dosificaciones de fibra se muestran a continuación.

Tabla 4.1: Resultados ensayos a tracción

TRACCIÓN						
Mezcla	Probeta	$f'_t [MPa]$	ε_{cr} [mm/mm]	$\varepsilon_{ut[80\%]}$ [mm/mm]	Energía post fisuración [J]	$E_c [MPa]$
M1	M1-0 %-v1	1.884	0.000205	0.000243	0.075	17775
	M1-0 %-v3	1.758	0.000158	0.000515	0.365	21300
	M1-0.5 %-v2	1.922	0.000155	0.019	24.536	17872
	M1-0.5 %-v4	2.009	0.000167	0.0023	2.050	12369
	M1-1 %-v1	1.786	0.000181	0.0054	4.552	17575
	M1-1 %-v2	1.565	0.000124	0.0064	5.160	21836
M2	M2-0 %-v1	1.784	0.000118	0.000176	0.095	20857
	M2-0 %-v2	1.745	0.000133	0.000181	0.067	17474
	M2-0.5 %-v1	1.928	0.000165	0.000203	0.057	16258
	M2-0.5 %-v2	2.887	0.000192	0.000268	0.198	15939
	M2-1 %-v1	1.980	0.000154	0.000177	0.044	14460
	M2-1 %-v6	1.575	0.000145	0.000220	0.182	12046

f'_t : Tensión máxima a tracción

ε_{cr} : Deformación unitaria en el peak de tensión

$\varepsilon_{ut[80\%]}$: Deformación unitaria ultima a tracción para el 80 % de degradación de la resistencia máxima.

E_c : Modulo de elasticidad.

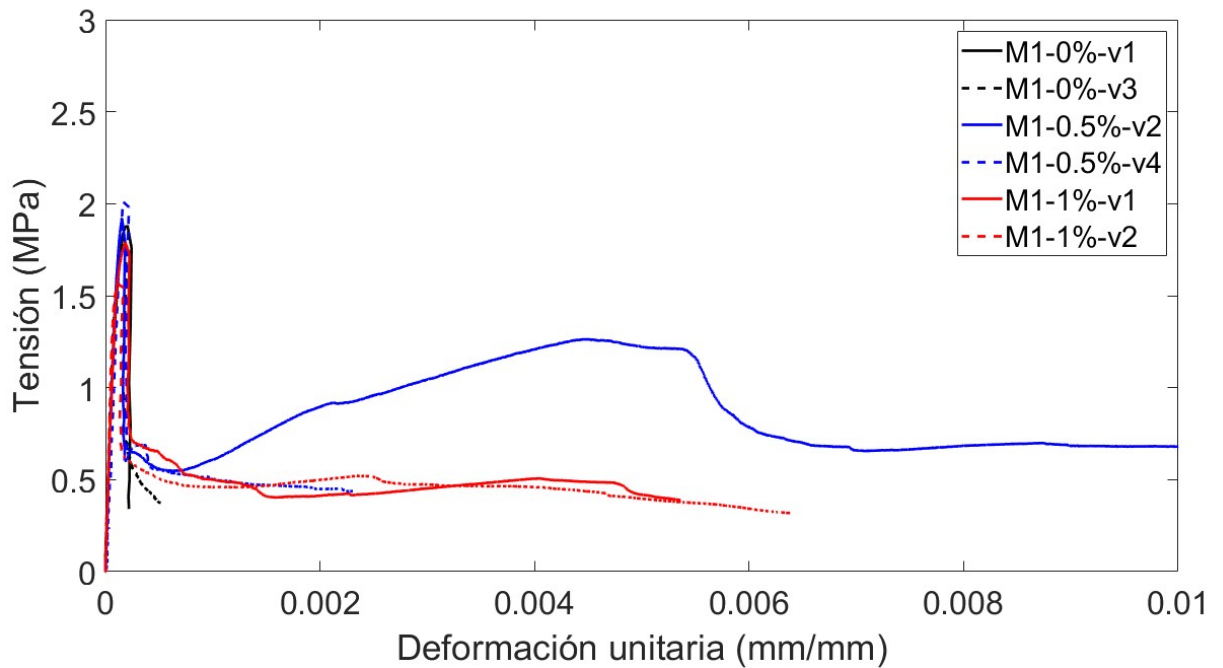


Figura 4.1: Ensayos a tracción directa para mezcla M1

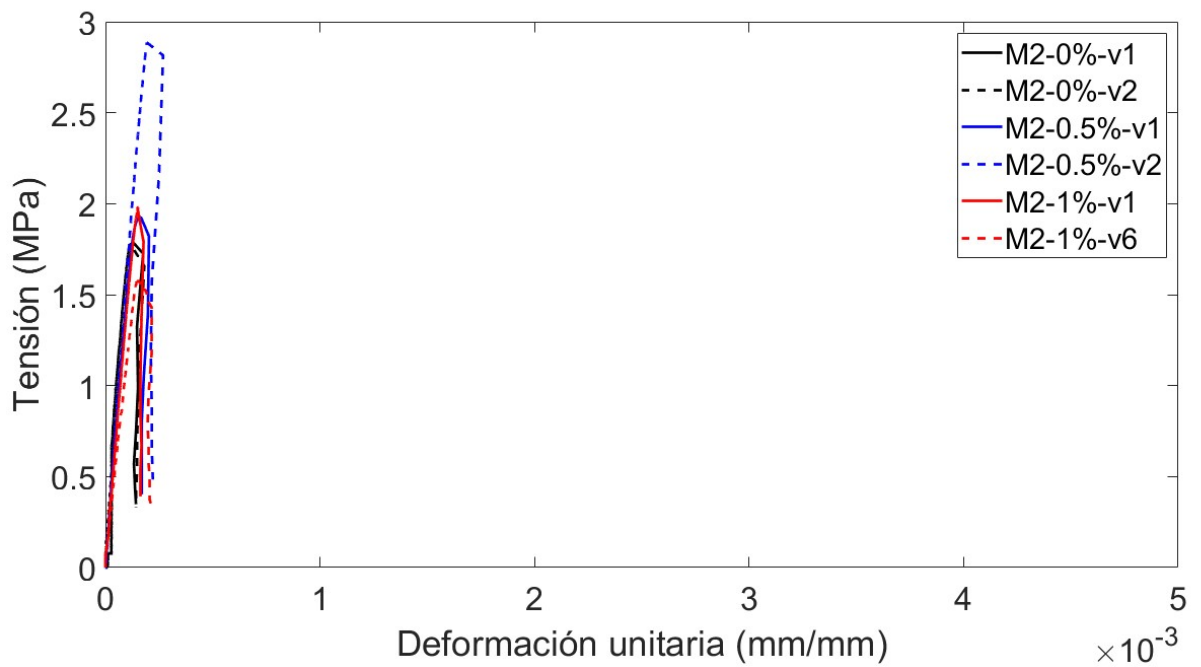


Figura 4.2: Ensayos a tracción directa para mezcla M2

Los siguientes gráficos muestran los valores promediados entre probetas de la misma mezcla y dosificación de fibras. Así, el primer gráfico muestra los valores obtenidos para los datos de energía post fisuración, mientras que el segundo lo hace para los datos de deformación unitaria última. Ambos registros considerados hasta el último valor que se encuentra asociado al 80% de degradación de la tensión máxima.

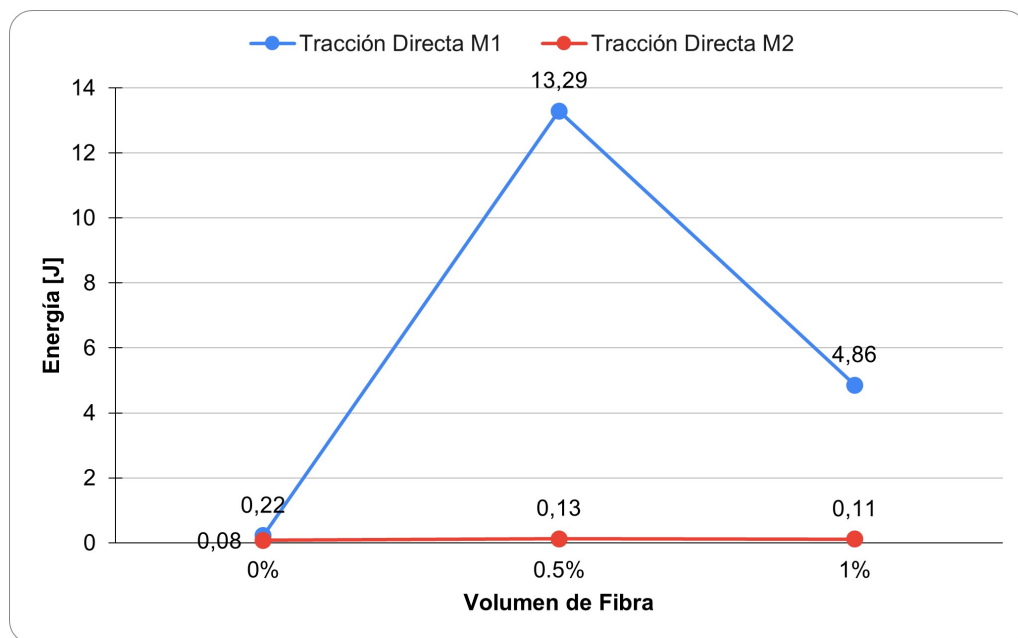


Figura 4.3: Energía post fisuración (hasta el 80% de degradación de la carga máxima) a tracción directa para mezclas M1 y M2

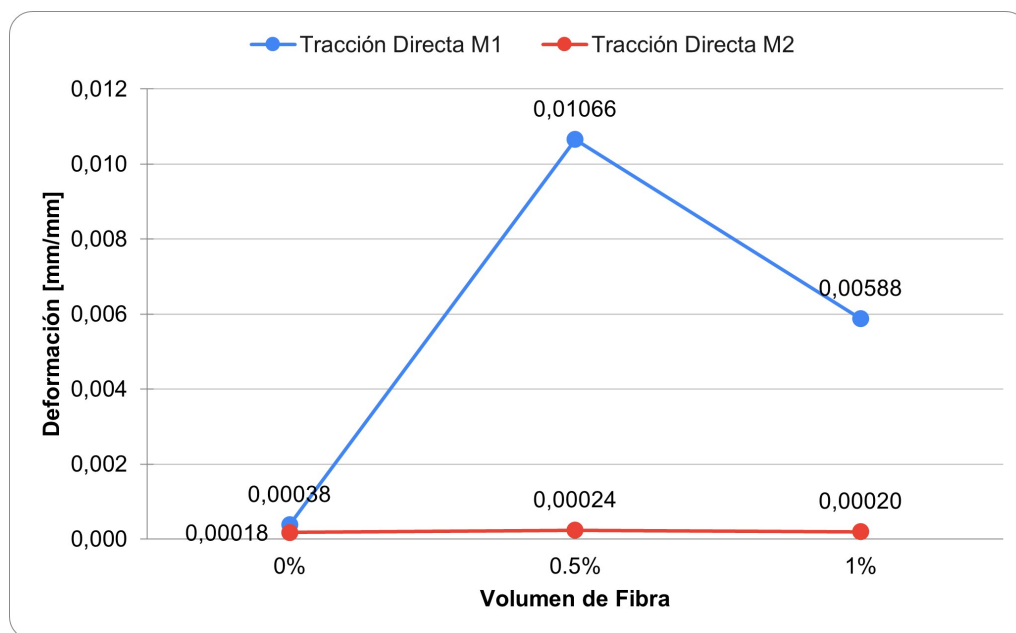


Figura 4.4: Deformación unitaria última (al 80 % de degradación de la carga máxima) a tracción directa para mezclas M1 y M2

A partir de los gráficos es posible notar que para la mezcla M1 con árido grueso (Figura 4.1) las tensiones máximas obtenidas y sus respectivas deformaciones tienen valores muy similares, sin embargo, se puede notar que existe una leve reducción en la tensión máxima obtenida al comparar las mezclas con 0.5 % y 1 %, siendo la mezcla con mayor volumen de acero un 15 % menor mientras que el caso sin fibras se encuentra a un valor intermedio entre ambas dosificaciones de acero. Esto puede deberse a que al incorporar una mayor cantidad de fibras existen más elementos que impiden que las burbujas de aire atrapado asciendan a la superficie durante el vibrado.

Por otra parte, la mezcla M1 muestra una caída fuerte al inicio del agrietamiento que se estabiliza y se mantiene a una tensión constante alrededor de los 0.5 MPa en donde las fibras tanto para dosificaciones de M1-0.5 % como para las de M1-1 % empiezan a recibir y resistir la tensión en la zona de falla, logrando así un efecto puente de tensiones transmitidas por la separación de las matrices de hormigón a las fibras ancladas a ellas y evitando una propagación descontrolada de la fisura. Contrario es el caso sin fibras para la misma mezcla, que presenta una caída brusca fallando de forma completamente frágil, sin permitir una mayor deformación a la observada en la probeta M1-0 %-v3 del material, la cual es despreciable en comparación a la ductilidad lograda por el material con fibras. Dicho lo anterior, se puede apreciar un claro incremento en ductilidad para las probetas con fibras de acero en comparación a las probetas sin fibras, comportándose de forma similar tanto para las probetas M1-0.5 % como para M1-1 %, e incluso llegando a presentar una caída de tensión post fisuración casi iguales, donde la matriz de hormigón detecta y transmite la carga a las fibras para una tensión cercana a los 0.5 MPa como se mencionó previamente. Siguiendo con la idea anterior y promediando los datos de la mezcla M1 para la energía post fisuración (gráfico 4.3), las probetas M1-0.5 % resultaron en un aumento de energía 59 veces mayor (13.29 [J]) a las probetas sin fibras (0.22 [J]) y para el caso de las M1-1 % (4.86 [J]) este valor fue 21 veces mayor con respecto al promedio de las probetas M1-0 %. Por último, la deformación unitaria

última lograda al añadir fibras de acero mostró una gran diferencia e incremento con respecto al material sin fibras (gráfico 4.4), llegando a ser 27 veces mayor para el caso M1-0.5% ($\varepsilon_{ut} = 0.01066$) y 14,5 veces mayor para el caso M1-1% ($\varepsilon_{ut} = 0.00588$). Estos resultados beneficiosos para las muestras M1-0.5% por sobre las de M1-1% se deben netamente a la aleatoriedad de la cantidad y orientación de fibras en la zona de la grieta por lo que, sobre todo en una sección de volumen reducido como lo es el de las probetas cilíndricas, sumado a la gran longitud de la fibra, no se hace posible obtener una tendencia clara a encontrar una mayor cantidad de fibras en orientaciones aptas para controlar la grieta y así obtener una mejora dúctil al aumentar la dosis de fibras como era de esperarse, es decir, la distribución de fibras pierde homogeneidad y las orientaciones se vuelven menos aleatorias. En las siguientes imágenes se muestran las probetas M1-0.5% v2 (figura (a) y (b)) y M1-1%-v1 (figura (c) y (d)) partidas en la sección de la fisura, donde se puede apreciar que la probeta de 0.5% logró encontrar una mayor cantidad de fibras en el camino de la grieta mientras que en la de 1% se observa una cantidad menor de fibras, donde la mayoría de ellas se encuentran con un largo de empotramiento bajo. De cualquier modo, es importante notar que, a pesar de la escasa cantidad de fibras encontrada en la sección, el efecto dúctil aparece de todas formas.



(a) M1-0.5 % v2



(b) M1-0.5 % v2



(c) M1-1 % v1



(d) M1-1 % v1

Figura 4.5: Fallas probetas M1-0.5 % v2 y M1-1 % v1

Con respecto a la mezcla M2 (figura 4.2), esta se comporta de forma similar para las tres dosificaciones, fallando de forma frágil e instantánea. logrando incrementos despreciables tanto de energía como deformación en comparación a los valores obtenidos para la mezcla M1 (figuras 4.3 y 4.4). El porcentaje de incremento en energía para la mezcla M2 con respecto a las probetas sin fibras (0.08 [J]) fue de 57.7 % y 39.7 % para las probetas con volumen de fibras de 0.5 % (0.13 [J]) y 1 % (0.11 [J]) respectivamente. Para la deformación unitaria se obtuvo un 32 % y 11 % de incremento con respecto al material sin fibras para las probetas de 0.5 % y 1 % respectivamente. Esto puede deberse a que al tener mayor árido fino la superficie específica total aumenta y con ello el área de cemento adherido al árido, reduciendo no solo el contacto entre la superficie de la fibra con el cemento, sino que además aumentando su contacto directo con el árido, lo que le proporciona finalmente una reducción en la resistencia a extracción de la fibra producto de una menor tensión de roce en la interfaz fibra-matriz. Junto a esto dado que la máquina detiene las mediciones al 80 % de degradación del peak de carga, es probable que el comportamiento dúctil podría haberse manifestado dentro de ese 20 % restante que no fue registrado. De hecho, la probeta M2-1 % v2 si presentó ductilidad

sin embargo fue descartada ya que escapaba de la tendencia del resto de las probetas. Otra consideración a tener en cuenta y que puede explicar el mal comportamiento a tracción entre la mezcla M2 y la gran diferencia con la mezcla M1 es la relación entre el largo de la fibra y el tamaño del árido ($\frac{l_f}{D_{max}}$). Este valor, tal como se mencionó en la sección 2.5.1, debe encontrarse idealmente entre los 1.25 y 3, sin embargo, considerando los valores de la granulometría para la arena gruesa (tabla 3.6), el resultado obtenido para esta relación es de 12.6 lo cual reduce el efecto puente producido por las fibras que cruzan el árido, es decir, si la fibra posee una longitud mucho mayor a la del árido, esta misma no logra rodear de forma eficiente las partículas y así evitar las microfisuras entre las ellas. Sumado a esto, las fibras se vuelven más propensas a doblarse en el proceso de mezclado reduciendo de esta forma su largo efectivo. Esto se puede ver en la figura B.2.e del anexo.

Por último, puesto que tanto para la mezcla M1 como para la mezcla M2 las grietas tendieron a propagarse en los extremos de la probeta, las fibras no lograron anclarse bien a la matriz ya que, como se puede ver en las figuras B.1 y B.2 del anexo, el largo de empotramiento no logra ser el adecuado para adherirse bien, sobre todo para los casos B.1.b y B.2.c.

4.2. Ensayos a Compresión

Para el caso de los ensayos a compresión la velocidad de ensayo fue de 0.3 mm/min y los datos obtenidos se ajustaron de la misma forma que para el caso a tracción, es decir, utilizando el registro de los sensores para la parte elástica y la medición de la máquina para la parte dúctil. Sin embargo, para este caso dado que algunas curvas se detuvieron antes de alcanzar el 80 % de degradación producto de su baja tasa de decaimiento (probetas M2-1 %-v3 y M2-1 %-v4) se optó por registrar los valores para una tasa de decaimiento estándar, la cual es de un 65 % de degradación. Con esto no solo se sería consistente con las comparaciones entre probetas, sino que además se permite comparar entre diferentes tipos de fibras ya que se utilizó el mismo valor para determinar el último dato de medición en ensayos con diferentes fibras realizados en los estudios efectuados por Marcela Herrera, Andrés Peralta y Felipe Concha. Además, es importante indicar que una de las probetas ensayadas (M1-0.5 %-v5) no fue incluida en el gráfico 4.6 puesto que se produjo una falla temprana y su resistencia máxima quedó muy por debajo del promedio del resto de las probetas. Respecto al fraguado, este fue de más de 85 días para todas las probetas a compresión. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.2: Resultados ensayos a compresión

COMPRESIÓN						
Mezcla	Probeta	f'_c [MPa]	ε_{cr} [mm/mm]	$\varepsilon_{uc[65\%]}$ [mm/mm]	Energía post fisuración _[65%] [J]	E_c [MPa]
M1	M1-0 %-v5	35,72	0.0038	0,006	87,85	15886
	M1-0 %-v7	32,74	0.0039	0,0062	96,46	12314
	M1-0.5 %-v3	34,22	0.0041	0,0144	348,35	10978
	M1-1 %-v3	33,56	0.0044	0,0147	383,22	7090
	M1-1 %-v4	32,97	0.0038	0,0172	454,74	13850
M2	M2-0 %-v4	28,27	0.0046	0,0055	39,61	12573
	M2-0 %-v5	29,55	0.0052	0,0064	32,52	6616
	M2-0.5 %-v3	30,82	0.0048	0,0141	266,82	13392
	M2-0.5 %-v4	27,57	0.0034	0,0049	45,78	12069
	M2-1 %-v3	28,21	0.0041	0,0347	694,65	12791
	M2-1 %-v4	30,58	0.0075	0.0187	324,13	8429

f'_c : Tensión máxima a compresión

ε_{cr} : Deformación unitaria en el peak de compresión

$\varepsilon_{uc[65\%]}$: Deformación unitaria ultima a compresión para el 65% de degradación de la resistencia máxima.

E_c : Modulo de elasticidad.

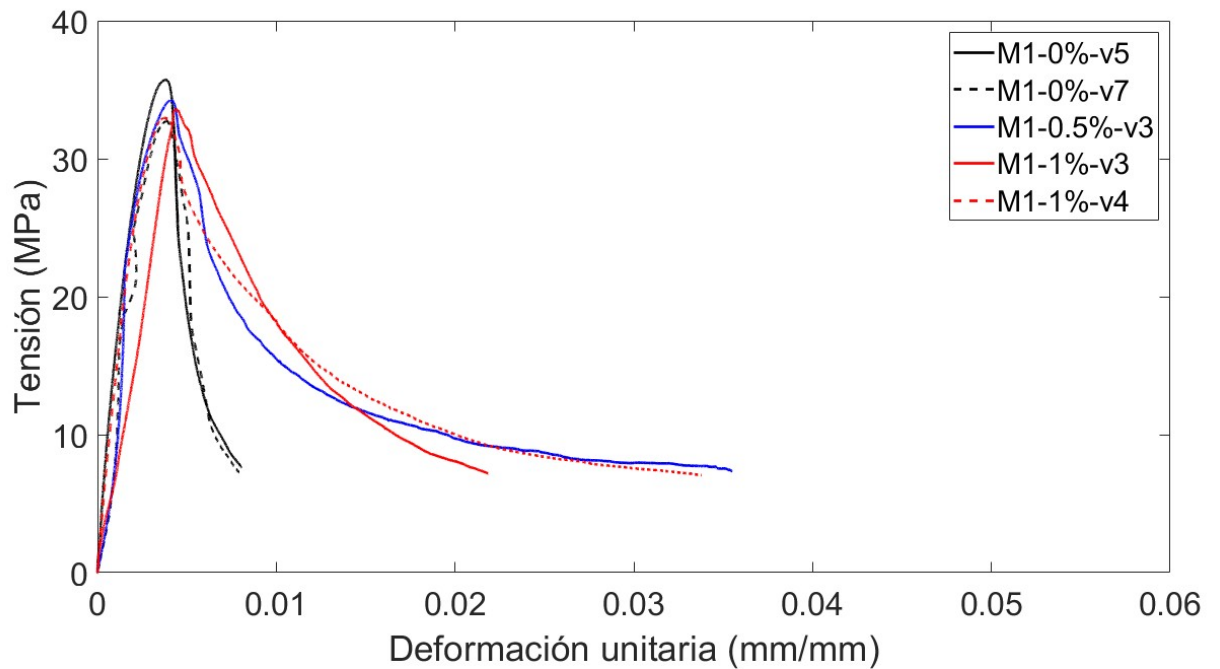


Figura 4.6: Ensayos a compresión para mezcla M1

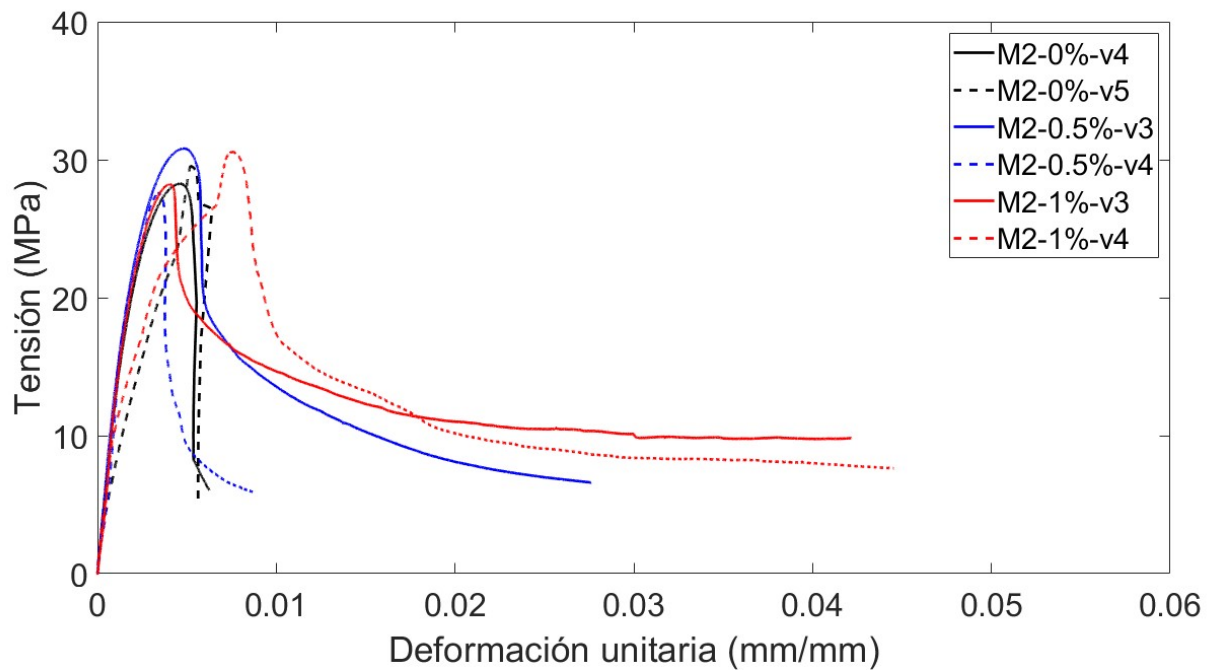


Figura 4.7: Ensayos a compresión para mezcla M2

Los siguientes gráficos muestran los valores promediados entre probetas de la misma mezcla y dosificación de fibras. Así, el primer gráfico muestra los valores obtenidos para los datos de energía post fisuración, mientras que el segundo lo hace para los datos de deformación última. Ambos registros considerados hasta el último valor que se encuentra asociado al 65 % de degradación de la tensión máxima.

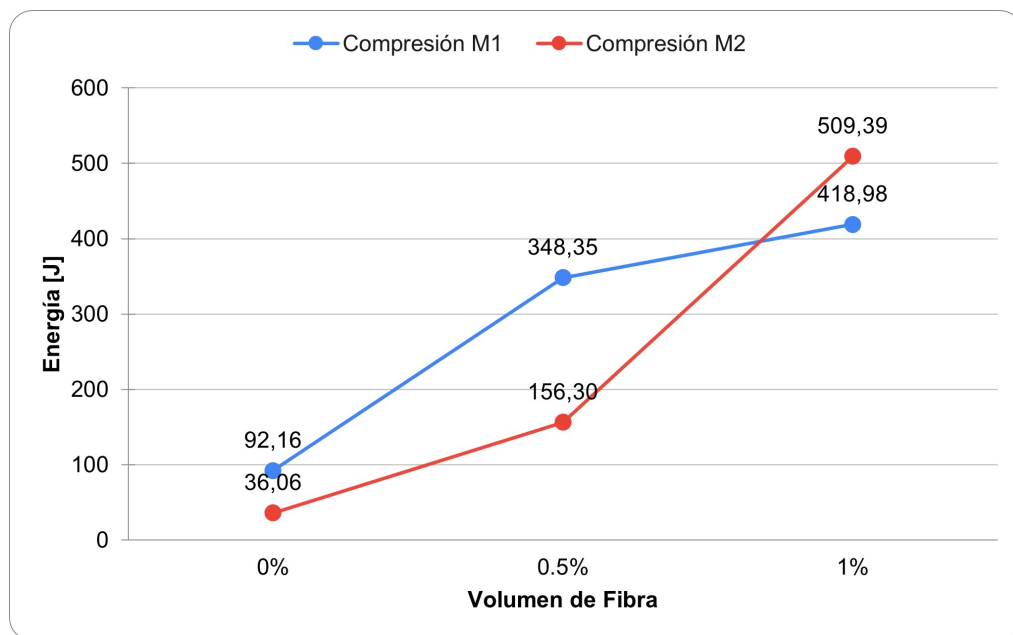


Figura 4.8: Energía post fisuración (al 65 % de degradación de la carga máxima) a compresión para mezclas M1 y M2

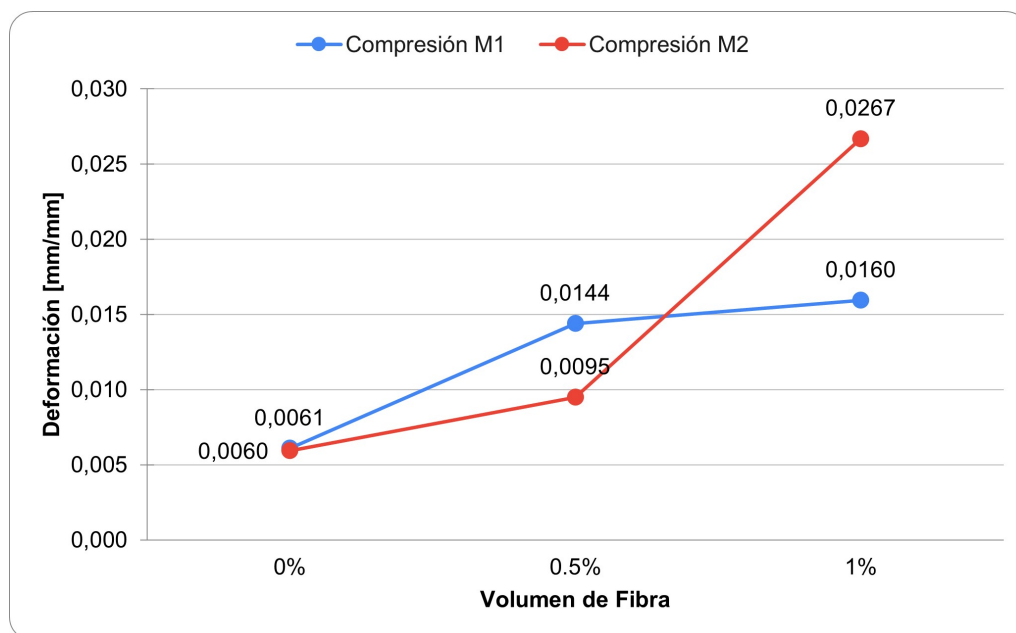


Figura 4.9: Deformación unitaria última (al 65 % de degradación de la carga máxima) a compresión para mezclas M1 y M2

De acuerdo a los resultados mostrados se puede observar que para ambas mezclas las resistencias f'_c son similares para las tres dosificaciones de fibras, incluyendo el caso sin fibras. La única diferencia respecto a los valores de resistencia f'_c se encuentra al comparar las mezclas M1 y M2 ya que la primera logra una clara ventaja en la resistencia máxima por sobre los valores obtenidos en las curvas de la mezcla M2, sin embargo, esto se debe netamente a la presencia del agregado grueso (gravilla) en la mezcla, lo cual aumenta la resistencia. De esta forma, el valor promedio de las tensiones máximas obtenidas por las curvas de la mezcla M1 entrega 33.8 MPa mientras que para el caso de la mezcla M2 este valor es de 29.2 MPa, es decir, se reduce en un 13.8 % el esfuerzo máximo de la zona elástica al quitar la gravilla de la mezcla.

Es por lo anterior que se puede afirmar que las fibras no influyen significativamente ni trabajan en la curva elástica a compresión. Sin embargo, para la zona posterior al agrietamiento si se generan diferencias considerables entre el material con fibras y sin. Tal como se puede notar en las imágenes 4.6 y 4.6, la deformación post agrietamiento tiende a aumentar al agregar fibras de acero e incluso la caída se vuelve más suave y asintótica al eje de la deformación unitaria. Si bien existen algunas curvas en que esta tendencia no se ve fuertemente reflejada, es importante recordar que la medición de la máquina se detiene al lograr una caída del 80 % de su resistencia máxima, es decir, existe un 20 % oculto para cada curva en que se hubiera esperado que esta siguiera de forma asintótica tal como ocurrió en los casos M2-1 %-v3 y M2-1 %-v4 (figura 4.7) donde se tuvo que detener la lectura de la máquina antes de alcanzar el 80 % de degradación producto de la gran deformación alcanzada y la leve o casi nula caída que se estaba generando.

Para la mezcla M1 en específico, se tienen curvas similares tanto para las dosificaciones de 1 % como la de 0.5 %. Logrando deformaciones mucho mayores al caso de la curva sin fibras y reduciendo la pendiente en la caída post agrietamiento. Así, el resultado del pro-

medio de los valores de las curvas con igual mezcla y cantidad de fibras (figura 4.9) entrega un 136 % de incremento de deformación última para el caso M1-0.5 % ($\varepsilon_{uc[65\%]} = 0.0144$) en comparación a los valores sin fibras ($\varepsilon_{uc[65\%]} = 0.0061$), mientras que para el caso M1-1 % ($\varepsilon_{uc[65\%]} = 0.0160$) este incremento es de un 161 %. Para la energía post fisuración y hasta el 65 % de decaimiento (figura 4.8) el incremento para la mezcla M1 con respecto a las probetas con 0 % de fibras (92.16[J]), fue de un 278 % y 355 % para las probetas con 0.5 % (348.35[J]) y 1 % (418.98[J]) de fibras respectivamente.

Por otra parte, para la mezcla M2 se tiene una mejor respuesta que para M1 y, con ello, una mayor diferencia entre las dosificaciones de 0.5 % y 1 % de acero, además de lograr, para esta última, una deformación que tuvo que detenerse a los 10 mm de desplazamiento registrado por la máquina debido a su tendencia completamente asintótica. Es por esto que la comparación debía realizarse para un rango de datos de hasta el 65 % de decaimiento de la tensión máxima en lugar del 80 %, ya que no se alcanzó este último valor. En esta mezcla si fue posible notar un aumento considerable al agregar mayores dosis de fibras a excepción de la curva M2-0.5 %-v2 que, si bien no logra una mayor deformación última, se puede notar una clara intención a permitir mayores deformaciones y a seguir la curva de forma asintótica. Junto a esto, las deformaciones últimas a compresión para la mezcla M2 (al 65 % de degradación de la tensión máxima) resultaron tener valores de un 58 % y 345 % de incremento para las dosis de fibras de 0.5 % ($\varepsilon_{uc[65\%]} = 0.0095$) y 1 % ($\varepsilon_{uc[65\%]} = 0.0267$) respectivamente. Para el incremento de energía absorbida con respecto al promedio de las probetas sin fibras (36.06[J]) se obtuvo un aumento de 3.3 y 13.1 veces para las probetas de 0.5 % (156.3[J]) y 1 % (509.39[J]) de volumen de fibras respectivamente.

Por último, el agrietamiento final de algunas probetas se puede visualizar en el anexo en las figuras B.3 y B.4, donde se tienen algunos casos con varias grietas verticales columnares pero sin conos bien formados (figuras B.3.a, B.3.b, B.3.e, B.4.e), sin embargo para la mayoría de los casos se formó una falla de tipo cortante (figuras B.3.c, B.4.a, B.4.c, B.4.d). Gracias al registro visual de las probetas y a los resultados gráficos entregados por los ensayos a compresión se puede afirmar que las fibras trabajan como una red que evita la separación y desprendimiento del material, permitiendo así resistir mayores deformaciones y controlar la propagación del agrietamiento.

4.3. Ensayos a Flexión

Los ensayos a flexión se realizaron a una velocidad de 0.3 mm/min usando una configuración de 3PBT y siguiendo las recomendaciones de los ensayos de hormigón reforzado con fibras de acero estipuladas en la norma EN14651 [20], considerando pequeñas diferencias producto de los materiales y elementos disponibles en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Para el procesamiento de datos se transformó la carga en tensión usando la norma mencionada previamente, además, fue necesario estimar una rigidez característica de la curva elástica para poder extrapolar los puntos iniciales que contaban con grandes deformaciones a baja carga debido al reacomodo de la vigueta producto de las rugosidades e imperfecciones en la superficie de contacto entre la vigueta y los puntos de apoyo y/o carga, lo cual entregaba resultados que requerían una corrección para la parte inicial y lineal de la curva. De acuerdo al rango de medición registrado, este se determinó para una deflexión de 10 mm indicados por la máquina ya que las curvas de

cada ensayo resultaron con una tasa de decaimiento de tensión muy baja que no permitía alcanzar el 80 % de degradación de la carga máxima (tal como se midió para los resultados a tracción). Es por lo anterior que la energía post fisuración fue calculada hasta los 8 mm de deflexión. Con esto los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 4.3: Resultados ensayos a flexión de 3PBT

FLEXIÓN					
Mezcla	Probeta	$f'_f [MPa]$	$\delta_{cr} [mm]$	Carga Máxima [MPa]	Energía post fisuración _[8mm] [J]
M1	M1-0 %-v1	5.753	0.281	5.753	37.64
	M1-0 %-v2	3.048	0.198	3.048	16.6
	M1-0.5 %-v1	4.207	0.248	5.756	16723
	M1-0.5 %-v2	4.207	0.245	5.876	17984
	M1-1 %-v1	5.054	0.311	5.427	19916
	M1-1 %-v2	4.086	0.228	5.717	21019
M2	M2-0 %-v1	2.840	0.263	2.840	13.52
	M2-0 %-v2	2.320	0.194	2.320	8.43
	M2-0.5 %-v1	2.616	0.261	2.616	8810
	M2-0.5 %-v2	2.499	0.269	2.499	7996
	M2-1 %-v1	2.899	0.269	4.063	14386
	M2-1 %-v2	3.239	0.242	5.678	18538

f'_f : Tensión máxima de agrietamiento (primer peak)

δ_{cr} : Deformación del primer peak de carga.

Energía post fisuración_[8mm]: Energía post fisuración hasta los 8 mm de deflexión.

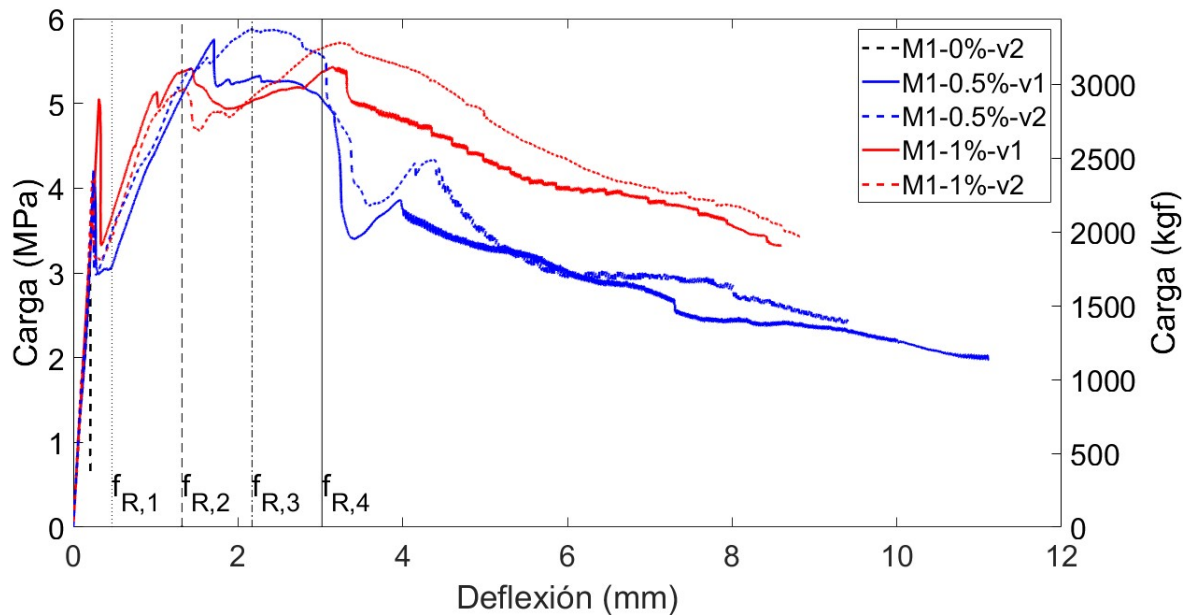


Figura 4.10: Ensayos a flexión de 3PBT para mezcla M1

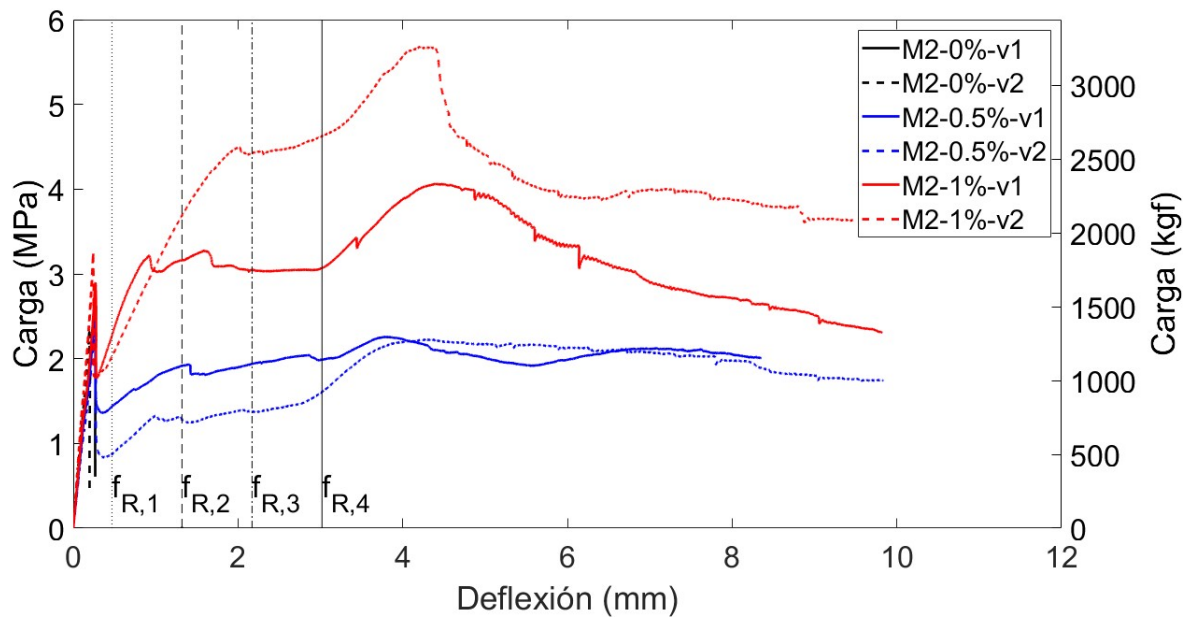


Figura 4.11: Ensayos a flexión de 3PBT para mezcla M2

El siguiente gráfico muestra los valores promediados entre viguetas de la misma mezcla y dosificación de fibras (viguetas idénticas), comparando de forma directa los promedios de cada volumen de fibra para la energía entre el rango de deflexión post fisuración y los 8 mm.

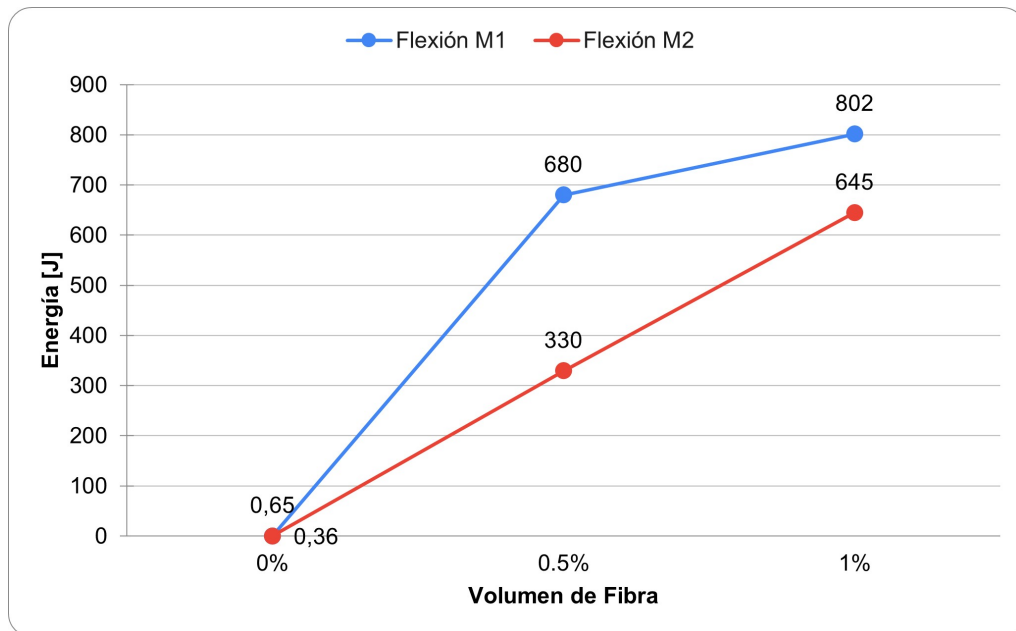


Figura 4.12: Energía post fisuración a flexión hasta los 8 mm de deflexión, mezclas M1 y M2

Tal como se puede observar en los gráficos 4.10 y 4.11, se obtuvo un gran trabajo de las fibras al ser sometidas a los ensayos de flexión, logrando para ambas mezclas una tremenda ductilidad y deformación post agrietamiento. Además de esto, ambas mezclas presentaron comportamientos muy similares entre viguetas idénticas (misma dosificación de árido y de

fibras) al agregar fibras, logrando no solo una menor diferencia entre las resistencias del primer peak elástico, sino que, por sobre todo, curvas que responden de la misma forma para cada valor de deflexión. Distinto es el caso para las probetas idénticas sin fibras, donde los valores de tensión máxima presentaron mayores fluctuaciones.

Con respecto a los resultados de la mezcla M1, la caída de tensión post agrietamiento para las dosificaciones sin fibras (M1-0 %-v1 y M1-0 %-v2) fue instantánea y frágil a diferencia de las viguetas con fibras, en donde la caída posterior al agrietamiento fue muy parecida para todos los casos (0.5 % y 1 % de fibras), disminuyendo hasta llegar a una tensión cercana a los 3.2 MPa antes de que se empezara a notar el efecto de las fibras. Luego de esto se presenta una clara falla dúctil que permite una gran deformación a flexión del material, dando incluso una resistencia extra que es superior a la tensión máxima del rango elástico, denominada en la literatura como endurecimiento por deformación. Lo anterior se produce cuando la fuerza de agarre entre las fibras y la matriz de hormigón es mayor a la tensión de fisuración. Esta deformación, para el caso de la mezcla M1, se presentó para todas las viguetas con fibras, logrando un incremento de resistencia respecto a la resistencia del límite elástico de un 38 % para el promedio de las viguetas con 0.5 % de fibras y un 22 % para el caso con 1 % de fibras. Si bien, el endurecimiento por deformación fue de mayor magnitud para el caso con 0.5 % de volumen de fibras que el de 1 %, la resistencia posterior a esto, es decir, a partir de los 3 mm de deflexión, fue mayor para la dosificación de 1 % de fibras logrando mantener una caída controlada y de muy baja pendiente para ambos volúmenes de fibras. Además, es posible notar que para la zona en la que la curva se vuelve más lineal, surgen caídas y subidas leves que forman una especie de rugosidad en la curva (a partir de los 4 mm en adelante, aproximadamente), esto se debe a que las fibras empiezan a ser extraídas de la matriz de hormigón a medida que la grieta se propaga, tomando a su vez, la carga de las fibras nuevas que se encuentra en el camino, logrando de esta forma un efecto de puente entre ambas secciones separadas y conectadas a través de las fibras.

Analizando el gráfico de la mezcla M2, tal como sucedió para el caso a compresión la resistencia del primer peak es considerablemente menor que para el caso con árido grueso. Por otra parte, se produce la misma falla frágil para los casos sin fibras mientras que los casos con fibras es posible apreciar nuevamente un endurecimiento por deformación pero en este caso se obtiene solo para la dosificación mayor de fibras, de 1 %, logrando un incremento promedio para ambas curvas (M2-1 %-v1 y M2-1 %-v2) de un 59 % de resistencia máxima en la zona dúctil con respecto a la tensión máxima de la zona elástica. Diferente es el caso para las fibras de 0.5 % puesto que en esta mezcla no se logró alcanzar el endurecimiento por deformación, sin embargo, la resistencia para la zona plástica sigue siendo importante, registrando un 88 % como promedio de las tensiones residuales máximas de ambas viguetas en comparación a los valores máximos de las curvas elásticas, incluso llegando a contar con una gran deflexión cuya carga se mantiene constante y cercana a los 2 MPa.

Es instantáneo desprender del gráfico de energía absorbida post fisuración (hasta los 8 mm de deflexión) en la figura 4.12 que el incremento para la mezcla M1 de los volúmenes de fibras de 0.5 % (680 [J]) y 1 % (802 [J]) con respecto al material sin fibras (0.65 [J]) fue de 1045 y 1233 veces. La mezcla M2 cuenta con un incremento promedio para las dosificaciones de 0.5 % (330 [J]) y 1 % (645 [J]) de 914 veces y 1790 veces respectivamente. Si bien estos resultados son más beneficios para la mezcla M2, esto se debe a que la comparación es con

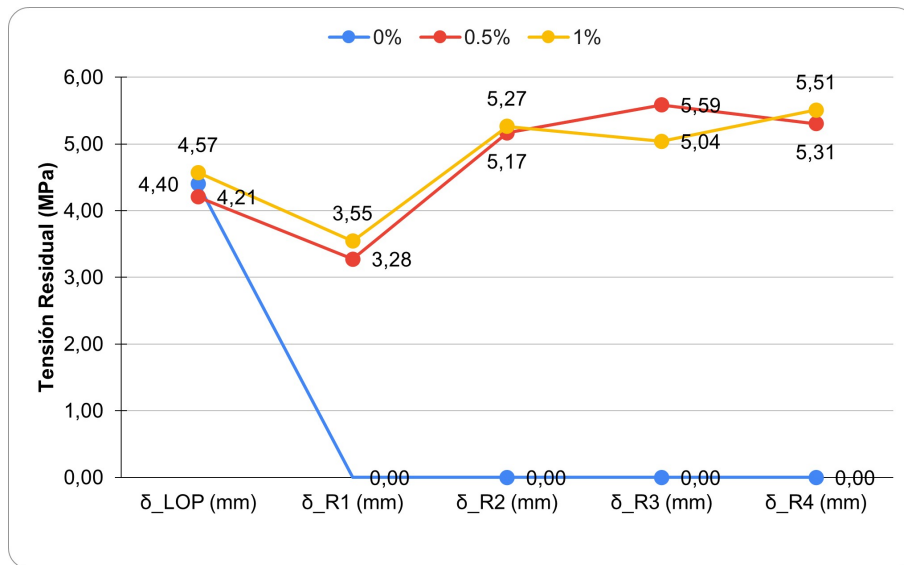
respecto a la energía de las probetas con 0 % de fibras, por lo que para la mezcla M1 este valor es mayor ya que la resistencia peak es mayor y con esto la cantidad de veces que se supera ese valor se ve reducida. Junto a lo anterior, comparando los resultados entre mezclas, las dosis de 0 %, 0.5 % y 1 % de la mezcla M1 obtuvieron un 81 %, 106 % y 24 % (respectivamente) de incremento en energía absorbida con respecto a los valores de los mismos volúmenes de fibras de la mezcla M2, permitiendo confirmar la ventaja de la mezcla M1 por sobre la M2.

De acuerdo a la falla producida, esta se materializa en una única grieta para la mayoría de los ensayos excepto algunos casos en los cuales se produjo una grieta principal con algunas fisuras cercanas a esta y con la misma orientación vertical (principalmente en dosificaciones de 1 %), tal como se puede ver en las figuras B.5.c y B.5.f. Ya que las grietas obtenidas son verticales y tienden a seguir una dirección recta tanto para los casos con y sin fibras, es posible afirmar que la falla ocurrida es inducida producto de la flexión en el material por sobre el efecto de corte. Además, el tamaño de la grieta para el caso sin fibras (figura B.5.a) con respecto a los casos con fibras es considerablemente menor en cuanto a apertura y altura de grieta, logrando, al incluir las fibras en la mezcla, una altura de grieta prácticamente igual a la altura de la sección de la vigueta tal como se puede ver en las imágenes del anexo B.5.

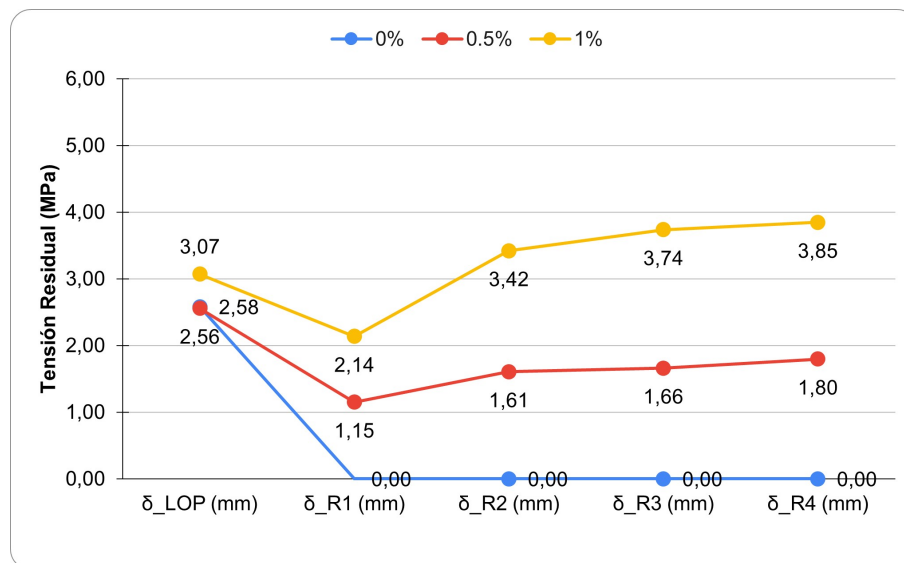
Por otra parte, según algunas normas europeas como la EN 14651 [20], existen deformaciones típicas definidas para medir algunos valores de tensiones residuales. Así, estos valores corresponden a las tensiones producidas para deflexiones de 0.47, 1.32, 2.17 y 3.02 mm, cuyos valores se obtienen de la conversión de la deformación de apertura de grieta (CMOD) para valores de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm. Con esto, en la siguiente tabla junto a las figuras 4.13.a y 4.13.b se muestran los valores para la tensión máxima del límite de proporcionalidad (f_{LOP}) y los 4 valores residuales ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$) que, a su misma vez, se pueden ver graficados en las figuras 4.10 y 4.11. Es importante aclarar que la tensión residual f_{LOP} se consideró como el valor de la resistencia máxima alcanzada para la zona elástica de la curva en lugar de seguir lo recomendado por la EN 14651 donde relaciona el f_{LOP} con la resistencia máxima alcanzada hasta una deflexión de 0.08 mm. Se implementó este ajuste debido a que las deformaciones en la zona elástica resultaron levemente alteradas producto del reacomodo entre las viguetas y los puntos de apoyo y carga. Este asentamiento induce a que las deflexiones a los 0.08 mm se encuentren al inicio de la curva elástica y no cercanas al peak, perdiendo la representatividad esperada por la definición del f_{LOP} .

Tabla 4.4: Tensiones residuales

Mezcla	Probeta	$f_{LOP}[MPa]$	$f_{R,1}[MPa]$ $\delta=0.47$ mm	$f_{R,2}[MPa]$ $\delta=1.32$ mm	$f_{R,3}[MPa]$ $\delta=2.17$ mm	$f_{R,4}[MPa]$ $\delta=3.02$ mm
M1	M1-0 %-v1	5.753	-	-	-	-
	M1-0 %-v2	3.048	-	-	-	-
	M1-0.5 %-v1	4.207	3.07	5.08	5.30	5.05
	M1-0.5 %-v2	4.207	3.48	5.25	5.87	5.56
	M1-1 %-v1	5.054	3.66	5.37	5.02	5.37
	M1-1 %-v2	4.086	3.43	5.16	5.06	5.65
M2	M2-0 %-v1	2.840	-	-	-	-
	M2-0 %-v2	2.320	-	-	-	-
	M2-0.5 %-v1	2.616	1.43	1.92	1.94	1.99
	M2-0.5 %-v2	2.499	0.87	1.29	1.38	1.60
	M2-1 %-v1	2.899	2.25	3.16	3.05	3.07
	M2-1 %-v2	3.239	2.02	3.68	4.42	4.62



(a) Tensiones residuales promedio mezcla M1



(b) Tensiones residuales promedio mezcla M2

Figura 4.13: Tensiones Residuales Promedio

Comparando los valores promedios de las tensiones residuales (figura 4.13) para las viguetas de 0.5% (mezcla M1), estas obtuvieron un 78%, 123%, 133% y 126% del valor f_{LOP} para las tensiones $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$ respectivamente. Esta misma comparación para el volumen de fibras de 1%, mezcla M1, resultó tener valores residuales de un 78%, 115%, 110% y 121% del valor f_{LOP} ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$ respectivamente). Con esto se puede observar que para estos valores la mezcla M1 posee resultados muy similares para las dosificaciones de 0.5% y 1% de fibras para los primeros 3 mm de deflexión. El incremento de las tensiones residuales $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$ para los datos promediados de 1% de volumen de fibras para la mezcla M1 son de un 8.2%, 1.9%, -9.8% y 3.9% de los valores obtenidos por las curvas de 0.5% respectivamente, es decir, el material se comportó de una forma muy parecida en los casos con fibras para deflexiones menores a 3 mm. Junto a estos datos, se puede notar la caída post fisuración y posterior endurecimiento por deformación, mostrando una gran capacidad resistente sobre todo para las deflexiones estudiadas.

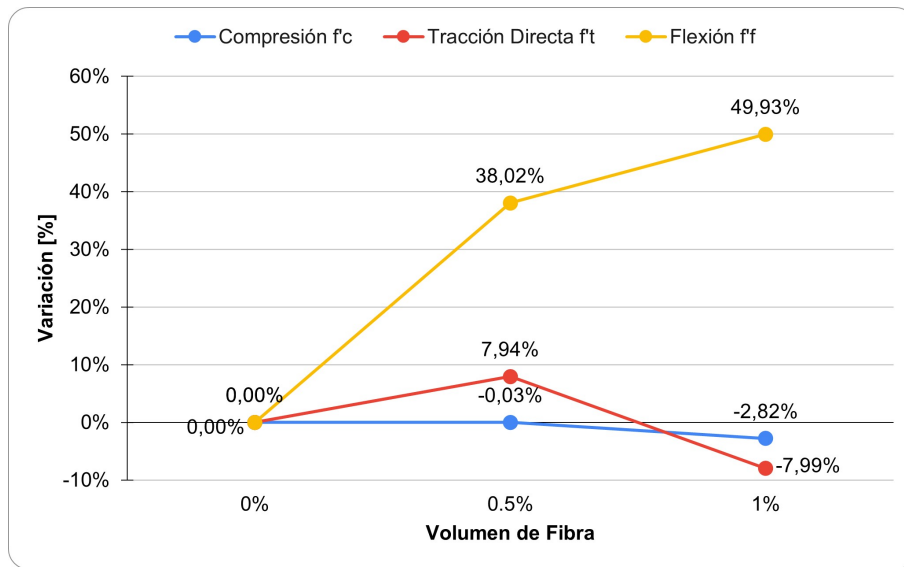
Para la mezcla M2 se nota una clara diferencia entre estos valores, además de contar con tensiones residuales mucho menores a las alcanzadas por la mezcla M1. Dicho esto, el porcentaje de las tensiones residuales respecto a los valores f_{LOP} , en promedio para las viguetas de 0.5 % de fibras es de 45 %, 63 %, 65 % y 70 % ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$ respectivamente). Tal como se mencionó, la mezcla M2-0.5 % no logró superar la tensión del límite de proporcionalidad f_{LOP} . Por otro lado, realizando la misma comparación para los promedios de las viguetas M2-1 %, se lograron valores de un 70 %, 111 %, 122 % y 125 % con respecto al f_{LOP} , superando nuevamente la tensión elástica máxima para las tensiones residuales $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$. Por último, la comparación entre fibras (0.5 % y 1 %) arroja que para un 1 % de fibras las tensiones $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$ obtuvieron un 86 %, 113 %, 125 % y 114 % de aumento respecto a las tensiones residuales de las viguetas con $V_f = 0.5$ %.

Finalmente, es importante revisar los valores mínimos de tensiones residuales determinados por las normas y/o códigos RILEM TC 162-TDF (RILEM, 2003), fib Model Code 2010 y ACI 318-19, en donde se logró su cumplimiento para todos los casos de la tabla 4.4 excepto para el valor $f_{R,1}$ obtenido por ambas viguetas de mezcla M2-0.5 % (marcado en rojo en la tabla), cuyo valor debiese superar los 1.5 MPa para cumplir con lo estipulado por RILEM sin embargo las viguetas M2-0.5 %-v1 y M2-0.5 %-v2 se encuentran un 4.6 % y 42 % bajo este valor respectivamente.

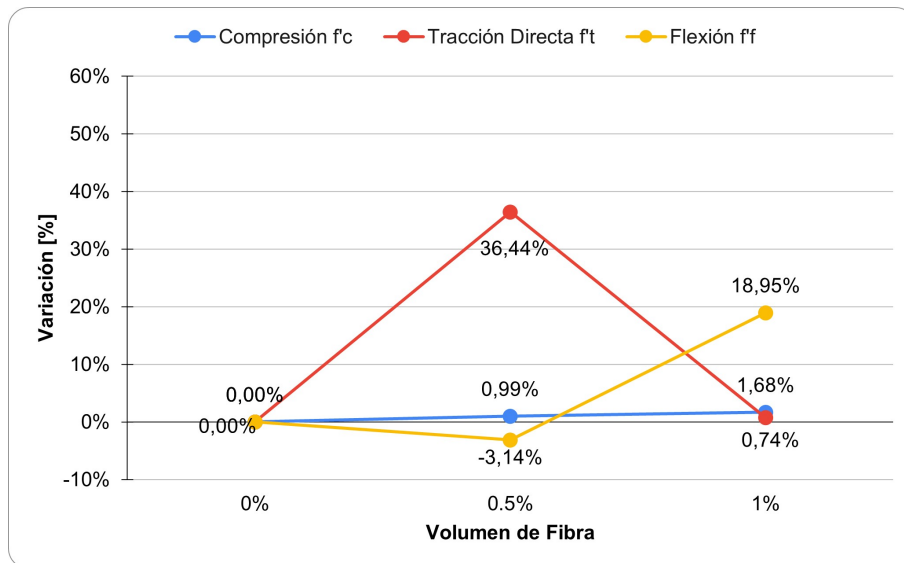
4.4. Comparación entre Ensayos

A continuación se mostrarán los resultados de forma gráfica, permitiendo realizar una comparación entre los tres ensayos estudiados (tracción, compresión y flexión) y los distintos volúmenes de fibras. Estos gráficos se encuentran de forma idéntica y estandarizada en las memorias de Felipe Concha, Andrés Peralta y Marcela Herrera (fibras de acero 3D y PVA con diferentes largos), con el fin de poder comparar los resultados entre diferentes tipos de fibras. Por lo mismo, para esta sección, los ensayos a flexión se estudian para una deflexión correspondiente a la asociada para $f_{R,1}$, es decir, hasta el valor de 3.02 mm de deflexión. Este valor se definió simplemente para permitir la comparación entre las memorias nombradas.

Los siguientes gráficos muestran los resultados promediados (entre probetas idénticas) para las tensiones máximas de la zona elástica. Los resultados para estos gráficos se basan en el incremento porcentual con respecto al promedio de las probetas sin fibras.



(a) Tensiones máximas mezcla M1



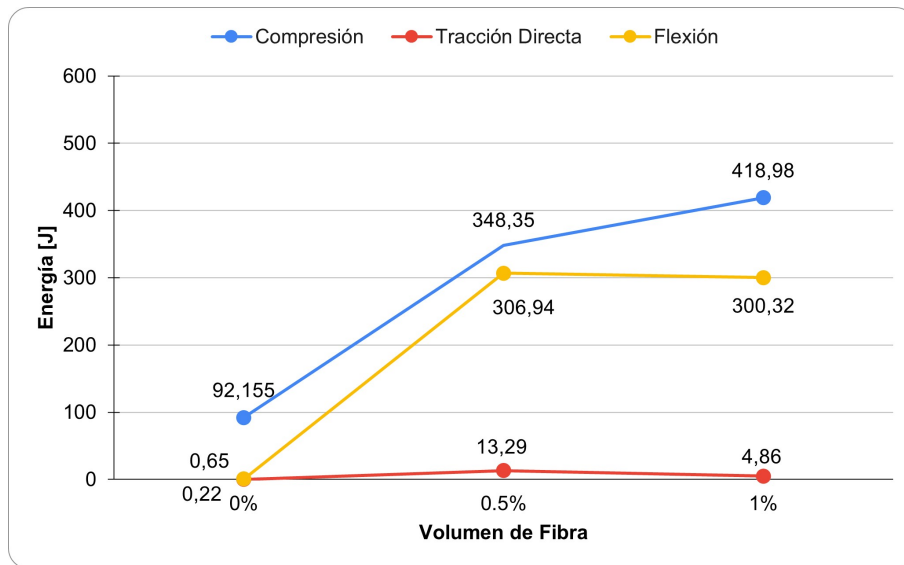
(b) Tensiones máximas mezcla M2

Figura 4.14: Variación porcentual tensiones en peak elástico ensayos a compresión, flexión y tracción, mezclas M1 y M2

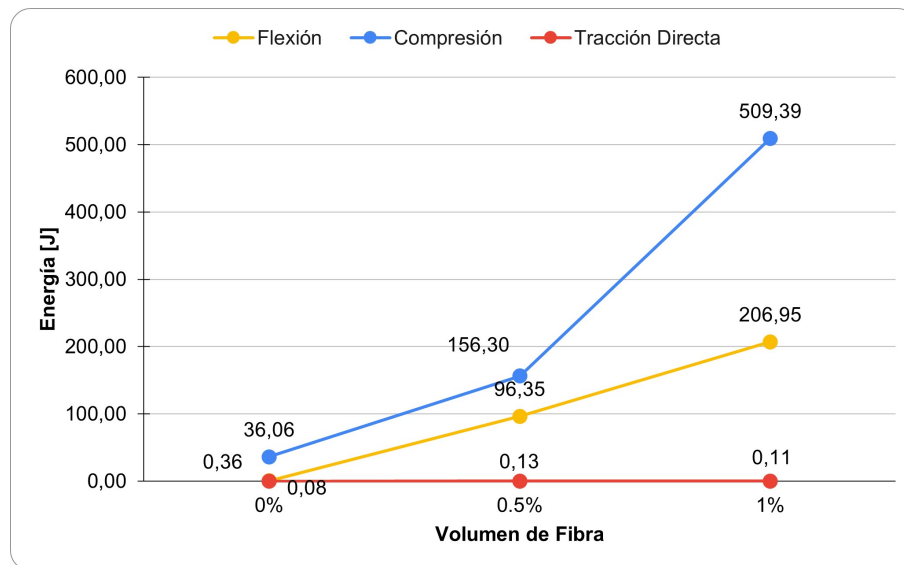
De acuerdo a los gráficos previos de incremento porcentual para las tensiones máximas de la zona elástica, se puede observar que no existe una tendencia muy clara que se pueda asociar al efecto de las fibras. De igual modo, nuevamente es posible confirmar la influencia de un volumen de probeta reducido para la longitud de fibra utilizada, ya que los resultados a tracción en ambas mezclas no mantienen un comportamiento similar al aumentar la dosis de fibras, consiguiendo mejores resultados para dosis de 0,5 % que 1 %. Por otra parte, para los casos a compresión se puede destacar la baja variación de tensión máxima con respecto a las probetas sin fibras, alcanzando porcentajes despreciables de variación de un -0.03 % y -2.82 % para las probetas M1-0.5 % y M1-1 % respectivamente. Para la mezcla M2 los valores anteriores siguen siendo bajos, estos son de 0.99 % y 1.68 % para las probetas M2-0.5 % y M2-1 %. De esta forma, es posible comprobar que la fibra no trabaja en la zona elástica. Por último, para los ensayos a flexión se logró un aumento al aumentar el volumen de fibras, en

especial para la mezcla M1 donde se logró retrasar la fisuración en un 38 % y 50 % para las viguetas con 0.5 % y 1 % de volumen de fibra. Para la mezcla M2 se tiene un comportamiento diferente a flexión, donde el volumen de 0.5 % resultó con una reducción de un -3.14 % mientras que para la vigueta M2-1 % se logró un incremento de un 19 %.

Para las siguientes imágenes se muestran los gráficos de energía post fisuración ya estudiados en las secciones anteriores donde se analizaron los resultados de forma individual por cada ensayo. El único resultado diferente corresponde al de energía ya que para el análisis a flexión en la sección "Ensayos a Flexión" la energía se consideró para un rango desde el peak elástico hasta una deflexión de 8 mm, lo cual alcanza a cubrir casi la totalidad de las curvas registradas por lo que posee una mayor representatividad. Sin embargo, para este caso se considera hasta una deflexión de 3.02 mm, tal como se mencionó al inicio, ya que para este valor es posible realizar una comparación con resultados de otros estudios con fibras. Del mismo modo, los resultados de energía post fisuración para los ensayos a compresión y tracción se mantienen hasta el valor de degradación de 65 % y 80 % respectivamente.



(a) Energía post fisuración mezcla M1



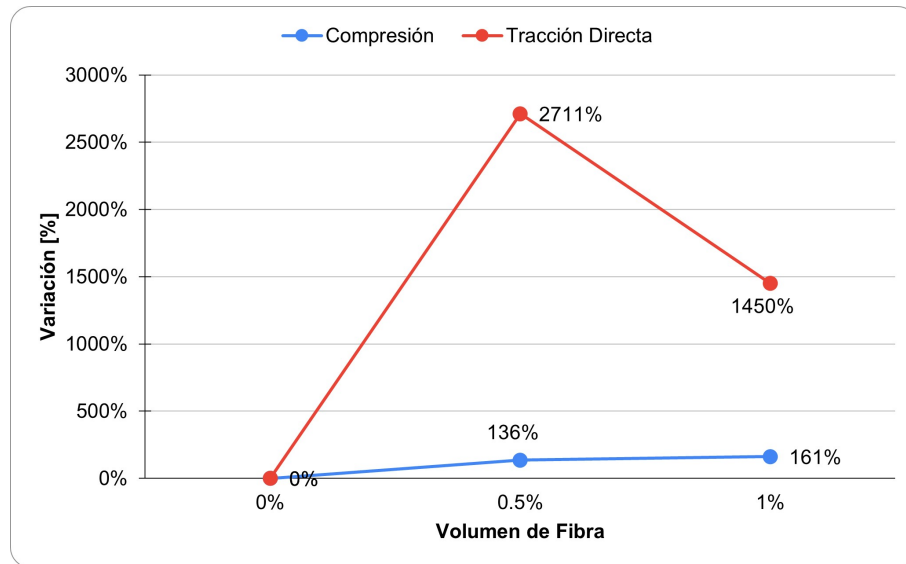
(b) Energía post fisuración mezcla M2

Figura 4.15: Energía post fisuración ensayos a compresión, flexión y tracción, mezclas M1 y M2

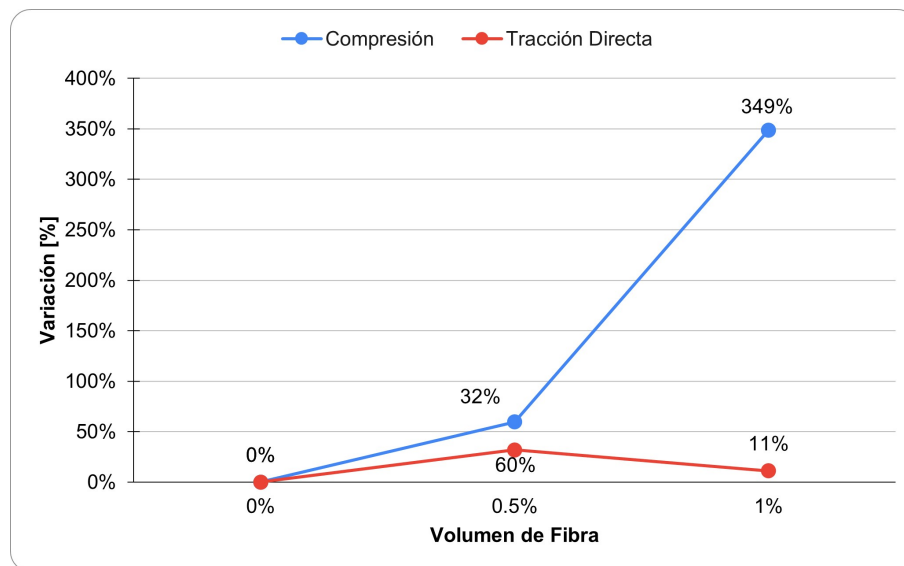
A partir de lo anterior, la única diferencia con lo estudiado previamente se refleja para los resultados a flexión de la mezcla M1, que se encuentran diferenciados con la tendencia observada en la figura 4.12 ya que los resultados para el valor de deflexión considerado (3.02 mm) son prácticamente iguales en ambas dosis de fibras, sin embargo, posterior a este valor se logra una clara diferencia que beneficia al material con 1 % de fibras tal como se puede ver en la figura 4.10.

Finalmente, para los siguientes gráficos se muestra la variación porcentual con respecto a las probetas de 0 % de fibras, considerando los ensayos a tracción y compresión, excluyendo los resultados a flexión ya que la deformación última no aplica como un parámetro comparativo para este caso ya que se cortó para todos los ensayos a los 8 mm de deflexión, por lo que no se podría apreciar ningún efecto de incremento o reducción al añadir fibras. Estos gráficos

ya fueron analizados y comparados en las secciones de "Ensayos a Compresión" y "Ensayos a tracción" por lo que se muestra únicamente para permitir una comparación más directa y cómoda para el lector.



(a) Deformación última mezcla M1



(b) Deformación última mezcla M2

Figura 4.16: Variación de deformación última ensayos a compresión (65 % de degradación) y tracción (80 % de degradación), mezclas M1 y M2

Capítulo 5

Conclusiones

Para el presente estudio experimental se logró llevar a cabo la totalidad de los ensayos a tracción directa, compresión y flexión para dos mezclas, M1 y M2, (con y sin árido grueso respectivamente) y 3 volúmenes distintos de fibras de acero (0 %, 0.5 % y 1 %) permitiendo así la caracterización del comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de acero 5D de 60 mm de largo.

De acuerdo a la literatura, para los ensayos a tracción se debería obtener un incremento en la ductilidad al aumentar la dosis de fibras, sin embargo, si bien se logró la ductilidad en la mezcla M1 para las probetas con fibras, no se logró un mejor comportamiento para la dosis de 1 % por sobre la de 0.5 %, esto se debe en parte al efecto producido por las condiciones de borde. Puesto que la longitud de la fibra corresponde a un 57 % del diámetro de la probeta y un 29 % de su altura, su orientación tiene una mayor tendencia a ser de forma vertical, por lo que los resultados a tracción pierden algo de representatividad. Por otra parte, la falla de la mayoría de las probetas ocurrió en los extremos, impidiendo que las fibras contaran con un anclaje adecuado para poder aguantar grandes cargas. De igual forma, se alcanzaron niveles de incremento energético (post fisuración) para las probetas M1-0.5 % y M1-1 % de 59 veces y 21 veces los valores obtenidos para las probetas sin fibras (M1-0 %). Para el caso de la mezcla M2 la totalidad de las probetas fallaron de forma frágil ya que, tal como se señala en la literatura, se recomienda una longitud de fibra de 1.25 a 3 veces mayor que el diámetro del tamaño máximo del agregado, lo cual, para la longitud de fibra usada, alcanzaba un valor de 12.6 veces el diámetro máximo de árido. Producto de esto, las fibras no logran adherirse bien a la matriz y, sobre todo, no logran rodear las partículas para poder cocer las micro fisuras entre ellas.

Los resultados a compresión permitieron confirmar el efecto de red que logra el HRFA y que, gracias a su longitud, permite atravesar varias grietas evitando la apertura del material producto de la compresión. De esta forma, para ambas mezclas la curva post agrietamiento se ve modificada al agregar fibras, adquiriendo una caída más suave y con una clara tendencia a volverse asintóticas al eje de las deformaciones. Por otra parte, los valores en la curva elástica no difieren significativamente, tal como era de esperarse, ya que las fibras no aportan resistencia a compresión. Respecto a la ductilidad, esta fue mayor para las probetas con fibras en comparación a las probetas sin, llegando a alcanzar, para la mezcla M2 y ambas probetas con volumen de 1 % de fibras, una deformación unitaria mayor a los 0.042 cuya lectura se detuvo puesto que la curva tomó una forma completamente asintótica. Así, los

resultados para la mezcla M2-1 % fueron mejores tanto en deformación última como en energía post fisuración (al 65 % de decaimiento) que los valores arrojados por las probetas M1-1 %, aumentando la energía en 13.1 y 3.55 veces (M2-1 % y M1-1 % respectivamente). sin embargo, para los valores con 0.5 % de fibras la mezcla M1 logró mejores resultados contando con un aumento de 3.3 veces la energía de las probetas con 0 %, mientras que para la mezcla M2 este resultado llegó hasta 2.8 veces. Esta inconsistencia puede deberse al mismo problema de las probetas a tracción, en donde el reducido volumen de la probeta no permite una distribución y orientación representativa por sobre todo para un reducido número de fibras como lo es el caso con $V_f = 0.5\%$, contando incluso con la mitad del número de fibras que para el volumen de 1 %.

Para el comportamiento a flexión de 3PBT, se obtuvieron los resultados esperados por la literatura alcanzando incluso el endurecimiento por deformación para todas las viguetas con fibra de la mezcla M1, aumentando en un 38 % y 22 % la tensión de fisuración para el promedio de los volúmenes de fibras de 0.5 % y 1 % respectivamente. La mezcla M2 alcanzó el endurecimiento por deformación solo para el volumen de 1 % de fibra, aumentando su tensión residual máxima en un 59 % con respecto a su tensión de fisuración. Diferente es el caso para las curvas obtenidas por las viguetas de 0.5 % que no lograron el endurecimiento por deformación, y si bien, registraron una deflexión mayor a los 8 mm, la tensión residual $f_{R,1}$ para una deflexión de 0.47 mm no cumple con la resistencia mínima recomendada por RILEM para garantizar un buen comportamiento del HRFA y evitar una caída brusca de tensión.

En cuanto a la energía absorbida post fisuración y hasta los 8 mm de deflexión, se llegó a contar, para la mezcla M1, con un incremento promedio de 1045 y 1233 veces comparando las dosis de 0.5 % y 1 % respectivamente con las de 0 %. Para la mezcla M2, la misma comparación resultó en un incremento de 914 y 1790 veces. Además, enfatizando en la importancia del tamaño de árido para este mismo punto, las dosis de 0 %, 0.5 % y 1 % de la mezcla M1, comparadas con los valores de la mezcla M2, obtuvieron un incremento de energía post fisuración de 81 %, 106 % y 24 % respectivamente por sobre los valores de la mezcla M2.

Por otra parte, gracias a la documentación de las probetas tanto cilíndricas como prismáticas, es posible afirmar que el modo de falla de la fibra es por extracción ya que no se obtuvieron fibras cortadas por fluencia. Junto a esto, los ganchos de las fibras resultaron levemente más enderezados, pero manteniendo aun así un grado de curvatura en los ganchos producto de su gran fuerza de anclaje y espesor. Además, fue posible comprobar el efecto puente en los ensayos de viguetas y cómo este permite resistir un aumento en la altura de la grieta y apertura, evitando además las grietas por corte gracias a la aleatoriedad de la orientación y distribución de las fibras.

Finalmente, a modo de resumen, la mezcla de árido grueso M1 resultó con mejores resultados que la mezcla de árido fino M2 en cuanto a ductilidad y resistencia ya que la fibra larga no se logra anclar bien al mortero. De acuerdo con los diferentes volúmenes de fibras, se obtuvo por lo general un mejor rendimiento dúctil para la dosificación de 1 % que la de 0.5 %, sin embargo, surgieron resultados como los vistos a tracción en los que no se logró esta mejora al aumentar las dosificaciones. Lo anterior es un indicador de que los ensayos a tracción no lograron la representatividad esperada y que probablemente se deba al reducido volumen de hormigón de la probeta para un tamaño de fibra como el utilizado, y que, junto

a esto, no se consiga una distribución homogénea de las fibras. De otra forma, el extremo de gancho 5D permite una gran adherencia y agarre al material de forma que para mezclas cuyo tamaño de árido sea el correcto según lo mencionado, es posible ganar una sobre resistencia en la zona dúctil.

Bibliografía

- [1] Carrillo J, Pincheira J, Alcocer S. Behavior of low-rise, steel fiber-reinforced concrete thin walls under shake table excitations. *Eng Struct* 2012;138:146–58.
- [2] Johnston, C. D. (2014). *Fiber-reinforced cements and concretes*. Crc Press.
- [3] Nilson, A. H., Darwin, D. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Colombia: McGraw-Hill.
- [4] Carrillo, J., Vargas, J. D., Arroyo, O. (2021). Correlation between Flexural–Tensile Performance of Concrete Reinforced with Hooked-End Steel Fibers Using US and European Standards. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(8), 04021211.
- [5] Chen, G., Gao, D., Zhu, H., Yuan, J. S., Xiao, X., Wang, W. (2021, October). Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades. In *Structures* (Vol. 33, pp. 3644-3654). Elsevier.
- [6] Han, J., Zhao, M., Chen, J., Lan, X. (2019). Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 577-591.
- [7] Abdallah, S., Rees, D. W., Ghaffar, S. H., Fan, M. (2018). Understanding the effects of hooked-end steel fibre geometry on the uniaxial tensile behaviour of self-compacting concrete. *Construction and building Materials*, 178, 484-494.
- [8] Abdallah, S., Fan, M., Rees, D. W. (2016). Analysis and modelling of mechanical anchorage of 4D/5D hooked end steel fibres. *Materials Design*, 112, 539-552.
- [9] Yazıcı, Ş., İnan, G., Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
- [10] Rizzuti, L., Bencardino, F. (2014). Effects of fibre volume fraction on the compressive and flexural experimental behaviour of SFRC. *Contemporary Engineering Sciences*, 7(8), 379-390.
- [11] ASTM. 2019a. Standard test method for flexural performance of fiberreinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM C1609. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [12] ACI (American Concrete Institute). 2019. Building code requirements for structural con-

crete. ACI 318-19. Farmington Hill, MI: ACI.

[13] Shende, A. M., Pande, A. M., Pathan, M. G. (2012). Experimental study on steel fiber reinforced concrete for M-40 grade. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 1(1), 043-048.

[14] Chun, B., Yoo, D. Y., Bantia, N. (2020). Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103669.

[15] Reveco Arriola, J. H. (2021). Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA.

[16] Swamy, R. N., Mangat, P. S. (1974). A theory for the flexural strength of steel fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 4(2), 313-325.

[17] Ozyurt, N., Mason, T. O., Shah, S. P. (2007). Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 70-79.

[18] Carmona, S., Molins, C., Aguado, A., Mora, F. (2016). Distribution of fibers in SFRC segments for tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 238-249.

[19] Arenas Valdés, A. (2021). Caracterización de la respuesta a tracción de hormigón reforzado con fibras de PVA.

[20] EN 14651 (2008). Test method for metallic fibered concrete – measuring the flexural-tensile strength (limit of proportionality [LOP], residual). European Committee for Standardization, CEN, Belgium.

[21] Singh, H. (2016). *Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design*. Springer.

Anexos

Anexo A. Resistencia vs tiempo de fraguado

La curva de resistencia para el hormigón tiene la característica de que para los primeros 28 días su aumento es considerable, llegando cerca de su máxima capacidad. Sin embargo, posterior a los 28 días la diferencia en resistencia se vuelve cada vez menor. A continuación se muestra una imagen que representa la resistencia a compresión del hormigón en porcentaje (el 100 % de su resistencia representa los 28 días) y en función del tiempo de fraguado:

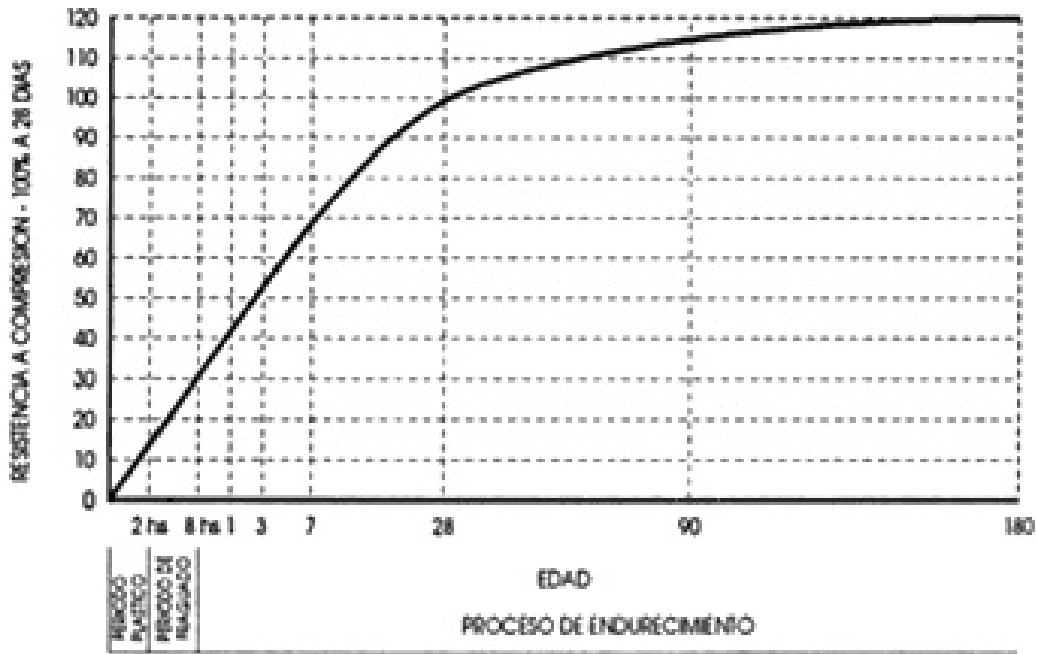


Figura A.1: Curva de resistencia en función del tiempo

Anexo B. Documentación Probetas

En esta sección se presentan las probetas ensayadas luego de su fractura, con el objetivo de poner a mostrar detalles como la zona de falla, distribución y orientación de las fibras, y estado de las fibras luego de los ensayos. Dado que son muchas las probetas ensayadas, se mostrarán las más representativas de cada dosificación y de cada ensayo.



(a) M1-1 % v1



(b) M1-1 % v2



(c) M1-0.5 % v4

Figura B.1: Fallas Tracción M1



(a) M2-1 % v1



(b) M2-1 % v1



(c) M2-1 % v6



(d) M2-0.5 % v1



(e) M2-0.5 % v5

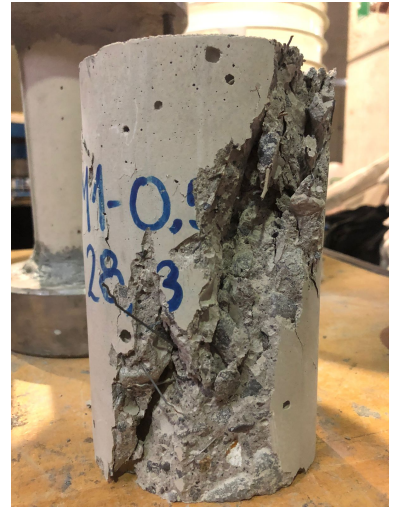
Figura B.2: Fallas Tracción M2



(a) M1-0% v5



(b) M1-0% v7



(c) M1-0.5% v3



(d) M1-0.5% v4



(e) M1-1% v3



(f) M1-1% v3 (2)

Figura B.3: Fallas Compresión M1



(a) M2-0% v5



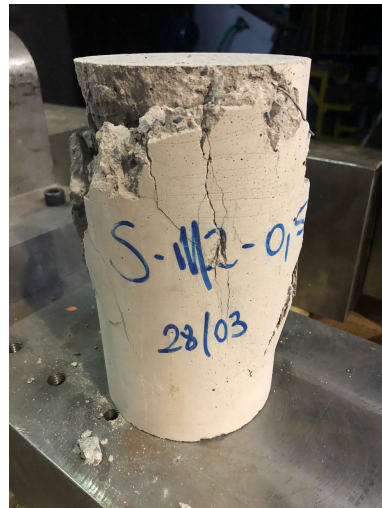
(b) M2-1%-v3



(c) M2-1% v3 (2)



(d) M2-1% v4



(e) M2-0.5% v3



(f) M2-0.5% v3 (2)

Figura B.4: Fallas Compresión M2



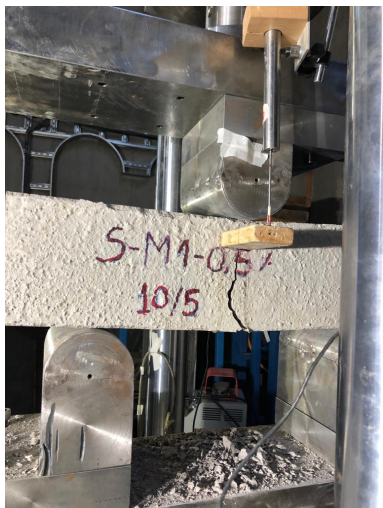
(a) M2-0%



(b) M2-1%



(c) M2-1%



(d) M1-0.5% v1



(e) M2-0.5% v2



(f) M1-0.5% v2

Figura B.5: Fallas flexión