



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

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN
REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO DRAMIX 3D 65/35**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANDRÉS CONCHA LLANQUIN

PROFESOR GUÍA:
Leonardo Massone Sánchez

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Fabián Rojas Barrales
Augusto Holmberg Fuenzalida

SANTIAGO DE CHILE
2023

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO DRAMIX 3D 65/35

Debido a una necesidad que existe de aumentar la resistencia a tracción del hormigón y la ductilidad de este frágil material, en este trabajo se estudia realizar esto desde la matriz, agregando fibras de acero Dramix 3D 65/35 a una mezcla de hormigón, esto se hizo variando las cuantías de fibras de acero y el tipo de árido a utilizar, a fin de obtener los mejores resultados posibles y hacer comparable este tipo de hormigón con el hormigón convencional, tratando de tomar en cuenta la mayor cantidad de variables posibles, por eso se busca caracterizar este material en todas sus facetas, es decir tracción, compresión y flexión, donde esta última se hará de forma indirecta a través de ensayos de 3 puntos. Una vez realizados los ensayos se procederá a exponer los resultados y hacer las comparaciones para verificar el comportamiento real que se obtiene de agregar fibras a la matriz de hormigón para mejorar propiedades, luego se buscarán los motivos que pueden mermar o reafirmar lo que se buscaba con tal de hacer el trabajo lo más completo posible.

Lo anterior se redujo a ensayos de 24 probetas cilíndricas de 110[mm] de diámetro y 210[mm] de largo y 12 viguetas prismáticas de 150x150[mm] de sección transversal y 530[mm] de largo. Las probetas cilíndricas se distribuyeron de la siguiente manera: se analizaron dos dosificaciones de áridos en la mezcla de hormigón, una de árido fino con diámetro máximo de árido de 4.75[mm] y otra de árido grueso con un diámetro máximo de árido de 19[mm], y al mismo tiempo en 3 cuantías de fibra de acero distintas, de 0, 0.5 % y 1 %, y se hicieron dos ensayos de cada tipo, lo que resume las 24 probetas ensayadas. En cuanto a las viguetas prismáticas se procedió de igual forma, es decir, dos dosificaciones de árido, una fina y otra gruesa, en 3 cuantías, de 0, 0.5 % y 1 %, y dos ensayos de cada tipo, lo que resultó en 12 ensayos en viguetas prismáticas.

En cuanto a la resistencia, se mostró con los ensayos a compresión y tracción directa que se reduce la resistencia en ambas mezclas al añadir fibras siendo más estable la mezcla con árido fino, aunque aún así menos resistente, mientras que a flexión con ambas mezclas se llegó a aumentos en la resistencia de hasta el 40 % con relación al hormigón sin fibras y se mantuvieron tensiones residuales aceptables. En cuanto a la capacidad de deformación en tracción y compresión la cuantía de 0.5 % de fibras de acero no sirvió para dar mucha mayor ductilidad al hormigón mientras que la cuantía del 1 % de fibra si aumentó la ductilidad, llegando hasta un 4.5 % de deformación unitaria en tracción y un 1.4 % en compresión, cabe destacar que en ambos casos la mezcla con árido fino aportó mayor capacidad de deformación. En el caso de la capacidad de deformación en flexión, esta se cuantifica mejor con la energía post fisuración, ya que muchos ensayos se deformaron más allá de lo que se podía tolerar con la máquina universal que realizaba los ensayos, y usando este parámetro se llegó a que ambas mezclas tienen una respuesta parecida en la capacidad de deformación, siendo ligeramente mejor la mezcla de árido grueso al absorber más energía, y en el caso de flexión la cuantía de fibras tuvo un comportamiento aproximadamente lineal en relación a la energía, por ende a la ductilidad, es decir, la cuantía del 0.5 % de fibra aportó en la capacidad de deformación, pero no tanto como una cuantía del 1 %.

Tabla de Contenido

1. 1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Principal	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	2
1.4. Estructura de la memoria	3
2. 2. Antecedentes de estudio	4
2.1. Antecedentes del uso de fibras	4
2.2. Características de las fibras de acero	5
2.2.1. Relación de aspecto	6
2.3. Dosificación	8
2.4. Ensayos	14
2.5. Modelación	18
2.5.1. Comportamiento a flexión	18
2.6. Resultados esperados	19
2.6.1. Ensayo de 3 puntos	19
3. 3. Metodología experimental	21
3.1. Materiales	21
3.1.1. Fibras de acero	24
3.2. Granulometría	25
3.3. Probetas	31
3.3.1. Construcción de las probetas cilíndricas	32
3.3.2. Construcción de las viguetas	34
3.4. Ensayos	37
3.4.1. Ensayos a tracción	37
3.4.2. Ensayos a compresión	40
3.4.3. Ensayos a flexión	41
3.4.4. Resumen de las probetas fabricadas.	42
4. 4. Resultado y análisis	46
4.1. Ensayos a tracción	46
4.2. Ensayos a compresión	50
4.3. Ensayos a flexión (Ensayo de 3 puntos)	54
4.4. Comparación entre ensayos	59

5. 5. Conclusiones	66
Bibliografía	70
Anexo	71

Índice de Tablas

3.1.	Propiedades mecánicas de las fibras Dramix 3D.	24
3.2.	Humedad en la arena fina.	26
3.3.	Humedad en la arena gruesa.	26
3.4.	Muestras de árido.	27
3.5.	Rótulo y apertura de malla.	27
3.6.	Granulometría árido fino.	28
3.7.	Granulometría árido grueso.	28
3.8.	Granulometría gravilla.	28
3.9.	Dosificación para la mezcla 1 y mezcla 2.	31
3.10.	Cuantías de acero a utilizar.	31
3.11.	Dimensiones de las probetas.	31
3.12.	Probetas cilíndricas.	32
3.13.	Viguetas.	32
3.14.	Probetas ensayadas a tracción.	37
3.15.	Probetas ensayadas a compresión.	40
3.16.	Viguetas ensayadas en 3 puntos.	41
3.17.	Datos de las probetas cilíndricas.	44
3.18.	Datos de las viguetas ensayadas en 3 puntos.	45
4.1.	Resistencia a tracción, deformación unitaria de fisura y última de los ensayos de tracción.	47
4.2.	Tenacidad o Energía post fisuración a tracción y parámetro de ductilidad a tracción.	47
4.3.	Resistencia a compresión, deformación unitaria de fisura y última de los ensayos de compresión.	50
4.4.	Parámetro para observar la ductilidad en ensayos de compresión y la energía post fisura en los ensayos de compresión.	51
4.5.	Resistencia a flexión, carga máxima y deformación de fisura en los ensayos de flexión.	54
4.6.	Energía post fisura en ensayo de 3 puntos estandarizado hasta la deformación de la tensión residual $f_4[MPa]$	55
4.7.	Tensiones (1, 2, 3, 4) según la norma EN14651.	57
4.8.	Resumen de los promedios de las tensiones.	59
4.9.	Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra.	61
4.10.	Variación de la energía post fisuración en los distintos ensayos usando como base los ensayos en probetas con 0 % de fibra, motivos por el cual los ensayos con 0 % de fibra tienen el valor 1.	64

Índice de Ilustraciones

2.1.	Fibras 5D, 4D y 3D respectivamente.	5
2.2.	Curvas tensión deformación tipo, con fibras Dramix	5
2.3.	Ensayo de Tracción sobre las distintas fibras Dramix.	6
2.4.	Ensayo pull-out sobre las distintas fibras Dramix.	6
2.5.	Ensayo de tensión a los 28 días.	7
2.6.	Ensayo de flexión a los 28 días.	7
2.7.	Influencia del agua y la relación entre áridos fino y grueso en la consistencia.	9
2.8.	Resistencia a compresión y los parámetros estadísticos de las muestras.	10
2.9.	Listado de mezclas para el estudio.	11
2.10.	Relación entre el cono y el D_{max} de árido para cada largo de fibra.	11
2.11.	Relación entre la resistencia a compresión y el D_{max} de árido para cada largo de fibra.	12
2.12.	Curva de carga-desplazamiento en ensayo de 3 puntos para D_{max} de 20 y 30[mm] del árido para distintos largos de fibra.	12
2.13.	Relación entre resistencia a flexión y D_{max} de árido para cada largo de fibra.	13
2.14.	Configuración de ensayo de 4 puntos.	14
2.15.	Configuración de ensayo de elasticidad.	15
2.16.	Ensayos de 3 y 4 puntos respectivamente.	16
2.17.	Configuración de los ensayos de 3 y 4 puntos respectivamente (a y b).	16
2.18.	Configuración del ensayo de 3 puntos para medir deflexiones	17
2.19.	Definición de las tensiones residuales (1,2,3,4).	18
2.20.	Características de las fibras utilizadas en el estudio.	19
2.21.	Resultados de los ensayos a 3 puntos.	19
2.22.	Resultados del ensayo de 3 puntos.	20
3.1.	Mezclador de cemento.	22
3.2.	Adhesivo epóxico	23
3.3.	Adhesivo de cianoacrilato.	23
3.4.	LVDT	24
3.5.	Fibra Dramix 3D	24
3.6.	Cruz en el árido	25
3.7.	Extracción de las dos esquinas	25
3.8.	Tambor donde se almacena el árido tapado.	26
3.9.	Granulometría de todos los áridos.	29
3.10.	Rotulado de las muestras.	29
3.11.	Horno.	30
3.12.	Pesado de las muestras.	30
3.13.	Tamizado de las muestras.	30
3.14.	Molde de la probeta cilíndrica	32

3.15.	Probeta cilíndrica después de hormigonar.	34
3.16.	Probeta cilíndrica después de desmoldada.	34
3.17.	Molde prismático después de aplicado el desmoldante.	35
3.18.	Vigueta en el proceso de regado.	36
3.19.	Máquina configurada en tracción.	38
3.20.	Probeta adherida a los discos de aluminio.	38
3.21.	Probeta en tracción.	39
3.22.	Falla correcta de la probeta.	39
3.23.	Falla incorrecta de la probeta.	39
3.24.	Rectificadora con la que se nivelaron las caras de la probeta.	40
3.25.	Configuración de probeta en compresión lista para ensayar.	41
3.26.	Configuración de la vigueta en ensayo de 3 puntos.	42
3.27.	Ubicación de las bases de madera en la vigueta en ensayo de 3 puntos.	42
4.1.	Ensayo de tracción directa para la mezcla 1 (Árido grueso).	48
4.2.	Ensayo de tracción directa para la mezcla 2 (Árido fino).	48
4.3.	Energía post fisura a una degradación del 80 % de la carga en tracción directa para ambas mezclas.	49
4.4.	Deformación última para una degradación de la carga del 80 % en tracción directa.	49
4.5.	Ensayo de compresión para la mezcla 1 (Árido grueso).	51
4.6.	Ensayo de compresión para la mezcla 2 (Árido fino).	52
4.7.	Energía post fisura a una degradación del 65 % de la carga en compresión para ambas mezclas.	52
4.8.	Deformación última para una degradación de la carga del 65 % en compresión.	53
4.9.	Ensayo de 3 puntos para la mezcla 1 (Árido grueso).	55
4.10.	Ensayo de 3 puntos para la mezcla 2 (Árido fino).	56
4.11.	Tensiones residuales promedios para la mezcla 1	57
4.12.	Tensiones residuales promedios para la mezcla 2	58
4.13.	Tensiones máximas promedio para la mezcla 1 en cada ensayo.	60
4.14.	Tensiones máximas promedio para la mezcla 2 en cada ensayo.	60
4.15.	Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 1.	61
4.16.	Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 2.	62
4.17.	Energías post fisuración promedio para la mezcla 1 en cada ensayo.	63
4.18.	Energías post fisuración promedio para la mezcla 2 en cada ensayo.	63
4.19.	Variación de las energías post fisuración obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 1.	64
4.20.	Variación de las energías post fisuración obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 2.	65

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Motivación

En el área de la ingeniería civil uno de los materiales más utilizados en la construcción de edificios en Chile es el hormigón armado, que consiste en una matriz de hormigón, una mezcla de áridos de distintos tamaños, con cemento, agua y aditivos según las necesidades específicas, y acero de refuerzo que consiste en barras de acero al carbono estriadas con una resistencia y espesor determinado según las sollicitaciones de carga y desplazamiento del edificio, estas están dispuestas de manera y forma que soporten estos desplazamientos y cargas junto con el hormigón. Las barras de acero se colocan porque a pesar de que el hormigón por si solo tiene una gran rigidez y resistencia a la compresión, carece de resistencia importante a tracción, que es lo que aporta el acero de refuerzo.

Luego por años se ha estudiado su comportamiento para poder darle el mejor aprovechamiento posible, y por otro lado, se empezaron agregar elementos a la matriz de hormigón para atenuar sus características más desfavorables, ya sea agregar materiales como poliestireno para reducir su peso que en muchas situaciones es una condicionante, o agregar químicos para disminuir el tiempo de fraguado, también se agregaron materiales que afectan directamente en el comportamiento mecánico del hormigón, cuyo principal objetivo es aumentar su pobre resistencia a tracción, uno de los materiales apuntados para poder cumplir esta función es el acero, que se caracteriza por su gran resistencia a tracción, y la forma en la que se puede introducir este material en la matriz de hormigón es en forma de fibras de gran esbeltez, que funcionarán como cables que unen las grietas que se formen, lo que debiera aumentar la resistencia a tracción, y en consecuencia flexión y corte del hormigón.

¿Por qué aumentar la resistencia a la tracción del hormigón desde la matriz? Porque entre los problemas más grandes del hormigón está su falta de resistencia a tracción, y por otro lado el costo de colocar barras en el hormigón, junto con el valor del acero aumenta constantemente, y al menos uno de estos costos se puede disminuir si es que parte de la ductilidad y resistencia necesaria para certificar un buen comportamiento de las estructuras de hormigón armado proviene de la matriz de hormigón.

Y entre las características más importantes a las que apunta el estudio del hormigón reforzado con fibras de acero o HRFA abreviándolo, es la ductilidad, que es la capacidad de un material de deformarse y seguir resistiendo carga. Esta es una de las características

que más carece el hormigón, por esto se dice que es un material frágil, ya que una vez alcanzada su peak de resistencia elástica, y por ende su deformación de fisura, deja de ser capaz de deformarse y tomar carga, esto nuevamente es subsanado por el hormigón armado, pero al ser un material compuesto el hormigón en paralelo al acero que tiene en su interior sigue fisurándose, y desde ese punto el acero empieza a tomar la mayor parte de la carga, esto supone algunas desventajas físicas, ya que los elementos no siempre están solicitados de forma uniforme y por esto muchas veces deben haber partes más reforzadas que otras, como por ejemplo, los suples de una losa, desventajas constructivas como estas pueden llegar a ser arregladas mejorando la matriz de hormigón y aumentando la ductilidad desde ahí, y así poder acercarse al comportamiento del hormigón armado sin las complejidades constructivas y físicas que este conlleva. Esta característica que se busca mejorar se ha hecho muchísimo más importante desde que en las estructuras prima el diseño por capacidad a la hora de construir, lo que significa que se pide más ductilidad a la hora de construir, y por ende, llegar a deformaciones mayores mientras se sigue tomando una gran cantidad de carga.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

El objetivo de esta memoria es comparar el comportamiento mecánico del hormigón con fibras de acero Dramix 3D 65/35 en distintas cuantías comparado con el hormigón corriente.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Estudiar un número de probetas cilíndricas a compresión y tracción sin fibras, y con dos cuantías de fibras de acero.
- Identificar la variación mecánica del comportamiento del hormigón convencional y el hormigón con las otras dos cuantías de fibras de acero.
- Cuantificar la variación de ductilidad del hormigón convencional y el hormigón con fibras de acero en ambas cuantías.
- Estudiar cuan razonable es utilizar fibras de acero en la matriz de hormigón y en qué cuantía podría significar un aporte notorio a su comportamiento.

1.3. Alcances

Por lo mencionado, en los siguientes capítulos se detallará la forma de comparar cuantitativamente el hormigón convencional, con el hormigón con fibras de acero con gancho Dramix 3D 65/35, de forma que se pueda aproximar de forma cercana cuánto aumenta la ductilidad y resistencia a flexión y tracción del hormigón al incluir cuantías volumétricas del 0.5% y 1% de fibras por metro cúbico, estos resultados concluirán en una caracterización detallada del material de estudio.

Esto se logrará a partir de ensayos de compresión y tracción en probetas cilíndricas y ensayos de flexión de 3 puntos (3PBT o 3 point bending test) en viguetas, que también servirán para medir ductilidad. Finalmente se tabularán y graficarán estos resultados dependiendo de las distintas variables impresas en las probetas para poder comparar cuantitativamente su comportamiento entre ellas.

1.4. Estructura de la memoria

Este trabajo consta de 5 capítulos donde cada capítulo tiene un fin específico, en este capítulo o el primer capítulo, se especificará la motivación, los objetivos generales y específicos, y los alcances que tiene esta memoria.

El capítulo 2 consta de una revisión bibliográfica acerca del tópico del que es este trabajo, es decir, hormigón reforzado con fibras de acero, y algunos de los avances que se han hecho a través del estudio de este material, como la influencia de una dosificación adecuada, la relación entre el árido y las fibras, y su influencia en el comportamiento mecánico como en la ductilidad. También se explorará como han resultado los ensayos que se les han hecho a lo largo del tiempo al hormigón reforzado con fibras de acero, la influencia del largo de esta fibra, y como es su comportamiento comparado con el hormigón corriente.

En el capítulo 3 se revisará todo lo que estuvo asociado a los ensayos, desde la fabricación de las probetas que se ensayaron, su cantidad, su tipo, ya que se estudiaron distintas dosificaciones de áridos y cuantías de fibras, hasta los ensayos mismos, ya que fueron tres clases de ensayos a realizar para caracterizar distintas propiedades. Con esto se expondrán las consideraciones que se tomaron al momento de hacer los ensayos, ya que es de suma relevancia tener claro a cabalidad que es lo que se está estudiando y en que condiciones se llevó a cabo.

En el capítulo 4 se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos sobre las probetas, así como comparaciones entre las mezclas estudiadas y las cuantías de fibra, entre los resultados se expondrán las resistencias, las deformaciones de fisuración, deformaciones de rotura y más con tal de sacar el máximo provecho posible de los datos que se obtuvieron de los ensayos.

Finalmente en el capítulo 5 se relatará a que conclusiones se puede llegar a partir de los resultados de la investigación y qué pudo haber estado involucrado en que los resultados hayan sido de esa forma, así como su correlación con lo estudiado anteriormente.

Capítulo 2

2. Antecedentes de estudio

2.1. Antecedentes del uso de fibras

El uso de fibras en el concreto (antes en base a cal) es la técnica más antigua conocida como refuerzo, se usaban las fibras en distintas formas en algunos casos de origen natural, aunque estas fueron usadas para incrementar la capacidad de carga de los elementos. Su uso data a la antigua Roma (300 A.C al 476 D.C), donde en el concreto milenario se descubrió que contenía fibras. También en muchos sitios antiguos en el medio este se encontraron ladrillos de lodo reforzados con paja, que datan de hace 10.000 años, por otro lado en América, también los indígenas que habitaban en Estados Unidos solían usar ladrillos de adobe secados al sol, que se cree que son de una mezcla de arena, arcilla y paja.

Luego siendo más contemporáneos, no fue hasta que James Romualdi (1962) que se entendieron mejor las propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA), con esto el desarrollo del HRFA continua hasta la actualidad, mucha investigación está orientada con el objetivo de generar guías para el testeo y los métodos de diseño de hormigón con fibras de acero, así como fibras sintéticas en conjunto con fibras de acero.

Es un hecho en la actualidad que cuando las fibras de acero se introducen aleatoriamente, pero uniformemente a lo largo de los elementos de hormigón, el hormigón presenta un mejor comportamiento bajo cargas estáticas y cuasi-estáticas, así como bajo fatiga e impulsos. Las fibras son más efectivas cuando la resistencia a tensión de las fibras utilizadas es comparable a la resistencia de la matriz de hormigón.

Se ha observado que la resistencia de anclaje, las propiedades de resistencia de las fibras y las propiedades de la matriz de hormigón juegan un rol principal en controlar el comportamiento del hormigón fisurado en los miembros de HRFA, ya que la carga que recae sobre las fibras en varios niveles de tensión depende completamente en la resistencia de anclaje de las fibras en el hormigón y sus propiedades mecánicas.[1]

2.2. Características de las fibras de acero

Las fibras de acero cuando se introdujeron como idea experimental en el hormigón no siempre fueron como en la actualidad, ya que en la actualidad hay una industria que comercializa y moderniza las fibras, para optimizar su rendimiento, entre ellas está Dramix de la empresa Bekaert, que introdujo las fibras de acero en 1970 con 1 gancho, las que en el futuro se conocerán como fibras Dramix 3D, luego la misma empresa desarrollaron las fibras Dramix 4D y 5D que tienen 1.5 y 2 ganchos respectivamente aumentando su capacidad de soportar carga y ductilidad variando el modo de falla de las fibras, pero todas generando ductilidad en el hormigón.



Figura 2.1: Fibras 5D, 4D y 3D respectivamente.

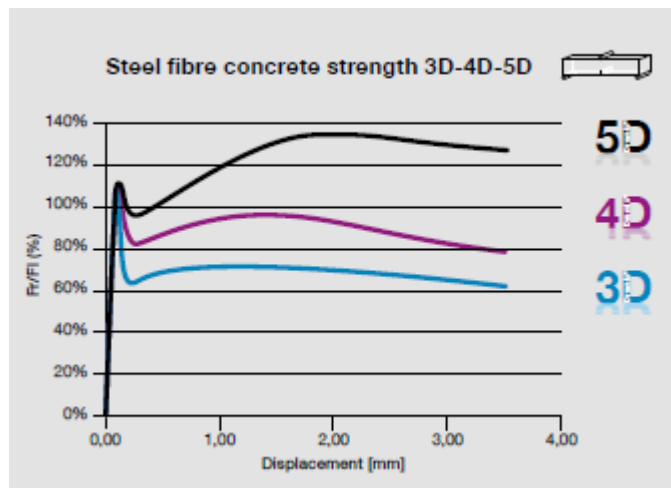


Figura 2.2: Curvas tensión deformación tipo, con fibras Dramix

A pesar de que todas generan ductilidad en el hormigón, no todas fallan de igual manera, ya que por su forma las fibras 3D fallan por anclaje en la matriz, al igual que las fibras 4D aunque estas con más tensión debido a su forma, mientras que las 5D desarrollan toda su capacidad al fallar por tracción. Esto se puede ver observando la resistencia del anclaje de la fibra (a través del ensayo pull-out) y el ensayo a tracción de las fibras.

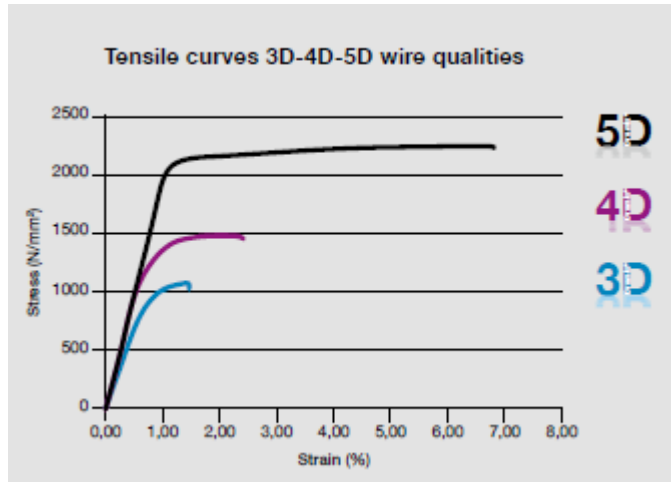


Figura 2.3: Ensayo de Tracción sobre las distintas fibras Dramix.

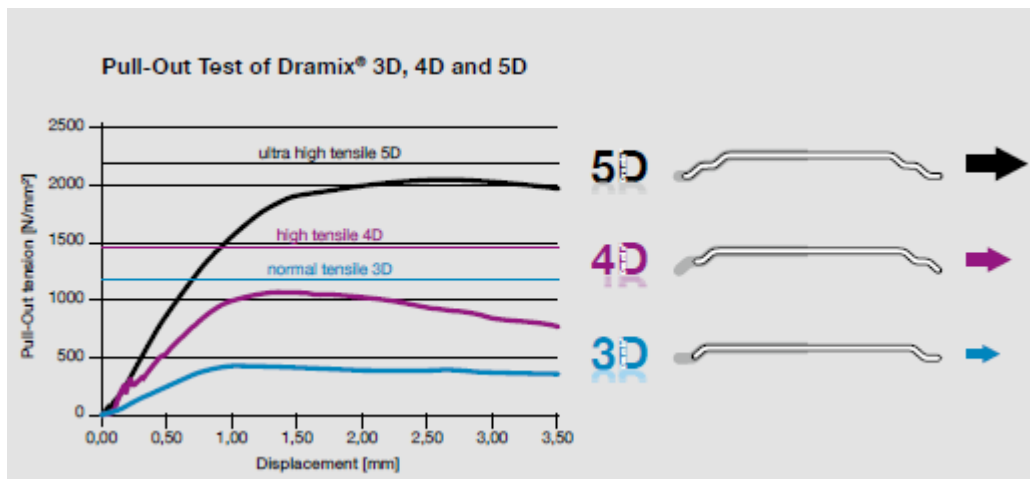


Figura 2.4: Ensayo pull-out sobre las distintas fibras Dramix.

Luego de ver los gráficos se puede ver como controla el ensayo pull-out en las fibras Dramix 3D y 4D al ser considerablemente más bajas que la resistencia a tracción de ellas.[2]

2.2.1. Relación de aspecto

En un estudio donde se estudió la tracción y la flexión de hormigón reforzado con fibras de acero, el ensayo de tensión hecho acorde la norma IS:5816, y el ensayo a flexión hecho según la norma IS:516, que es muy parecido en su configuración a un ensayo de 4 puntos (ver figura 2.14), se estudiaron 3 relaciones de aspecto en fibras, de 40, 50 y 60 (l_f/D_f), y cuantías de 1, 2, 3 y 4 % de fibras por los kilogramos de cemento en la mezcla, cuyo hormigón es de grado M30.

Finalmente estos ensayos arrojaron lo siguiente:

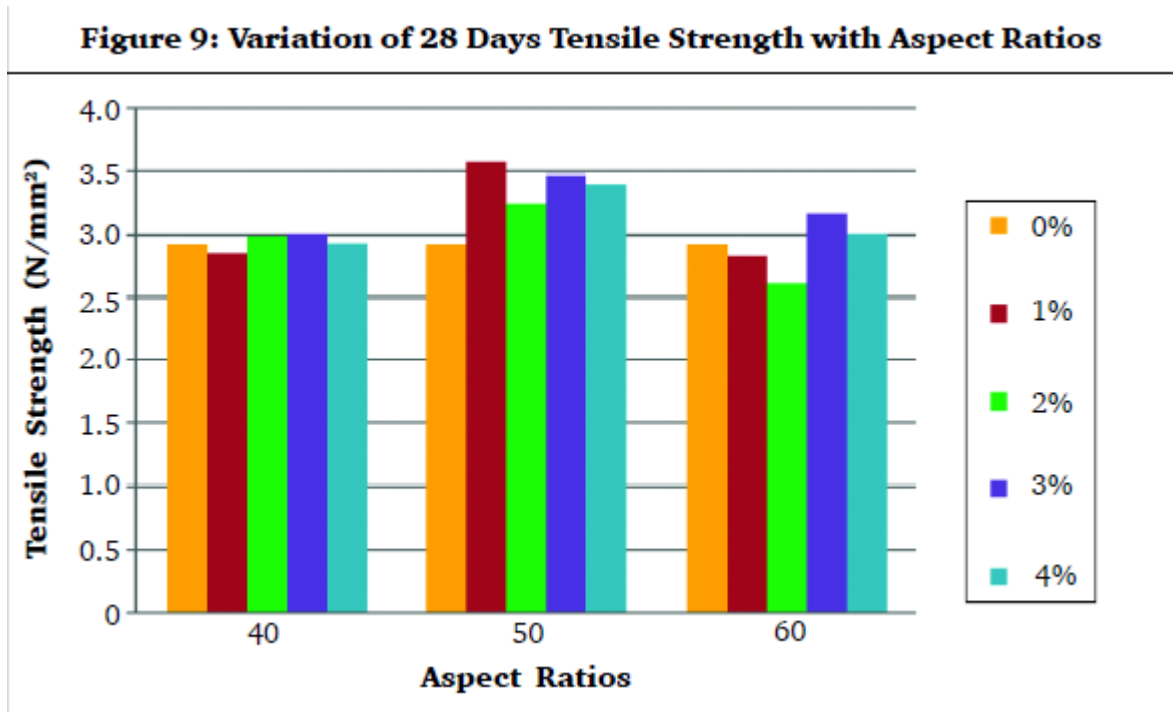


Figura 2.5: Ensayo de tensión a los 28 días.

[H]

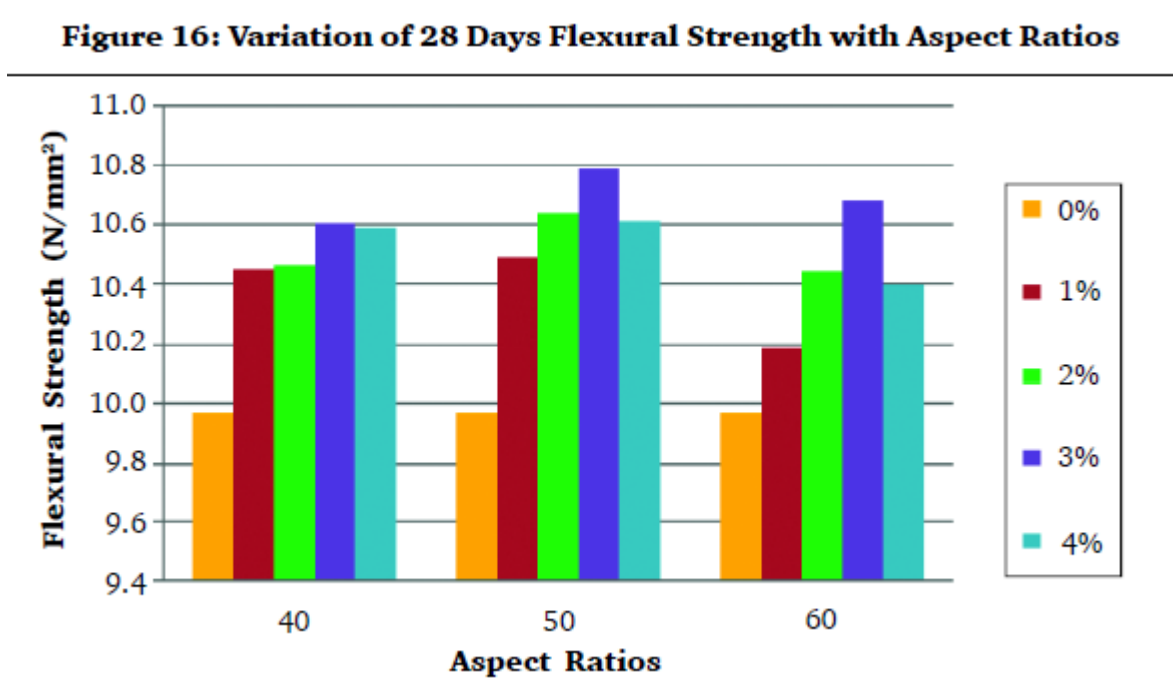


Figura 2.6: Ensayo de flexión a los 28 días.

A partir de este estudio se llegó a la conclusión de que entre las 3 relaciones de aspecto, la de 50, es la que mejores resultados arroja, aparte de que se optimiza la capacidad de las fibras a una cuantía de 3% de la cantidad de cemento en la mezcla.[3]

2.3. Dosificación

El cociente agua/cemento (A/C) está directamente relacionado con la resistencia y durabilidad del hormigón. Siendo el volumen de agua que entra en la mezcla el agua efectiva, que es el agua que queda después de la absorción de agua por parte de los áridos en caso de que la humedad de los áridos sea menor a la de equilibrio, o el aporte de agua que puedan realizar a la mezcla si es que la humedad de los áridos es superior a la de equilibrio.

Se recomienda favorecer la trabajabilidad del HRFA incrementando la cantidad de finos mediante adiciones activas en la fabricación, aunque esta es una opción válida, es delicada por el control que se debe tener de esta adición, sin embargo, este control es obligatorio cuando se trabaja con cemento Portland con adiciones. Con esto es posible fabricar HRFA con contenidos de cemento entre 450 y 300 $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Por otro lado la adición de fibras no impone ninguna especificación adicional al agua de amasado, pero si un incremento en el volumen de pasta y, por ende en el volumen de agua de amasado por metro cúbico de hormigón.

Otro factor importante en la dosificación es la relación entre áridos finos y gruesos, nótese que el máximo no depende del contenido de agua, ya que a agua constante el cono óptimo (que se maximiza con una relación de A/C , que implica mayor trabajabilidad) depende exclusivamente de esta proporción como se puede ver en la figura (2.7):

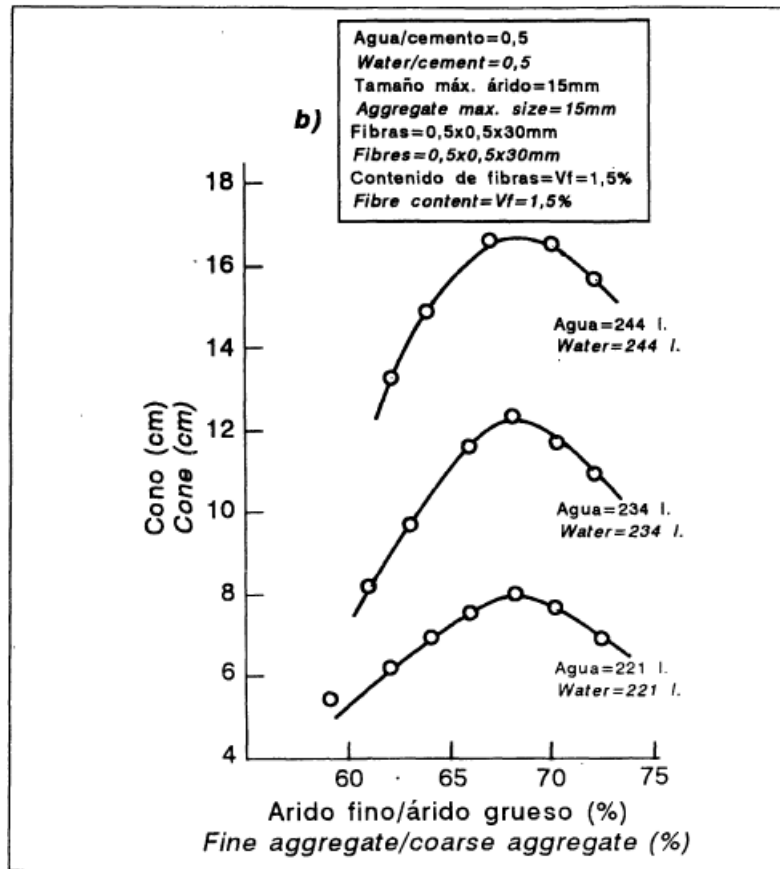


Figura 2.7: Influencia del agua y la relación entre áridos fino y grueso en la consistencia.

La adición de fibras al hormigón exige que también haya más pasta ya que se aumenta la superficie específica que debe rodear el hormigón, y para que no exista segregación se requiere mayor cantidad de árido fino, pero esto trae como consecuencia que se incremente la absorción y superficie específica del árido conjunto, esto cobra relevancia ya que reduce la docilidad del hormigón, por absorción durante el amasado.

Los ensayos de resistencia mecánica a compresión mostraron que a pesar de que la resistencia media aumenta a medida que se aumenta la cuantía de fibras de acero en el hormigón, también lo hace su dispersión, lo que provoca que a nivel de resistencia se anule este aumento.

(Compressive strength of SFRC at 28 days)

Cuantía (Quantity) (kg/m ³)	n° de datos (data)	Media muestral (Sample average) (Mpa)	D. típica muestral (D. typical sample) (Mpa)	Coef. de variación (Variation rate) (%)	Resistencia característica (Characteristic resistance) (Mpa)
0	6	44,5	1,51	3,4	42,0
40	6	46,1	1,77	3,8	43,2
80	6	49,5	2,17	4,4	45,9
120	6	50,7	3,20	6,3	45,4

Figura 2.8: Resistencia a compresión y los parámetros estadísticos de las muestras.

Para que el anclaje de los ganchos de las fibras en la matriz de hormigón sea eficaz, es aconsejable que diámetro máximo del árido no sea mayor a $2/3$ la longitud de la fibra, y mejor aún, no mayor a $1/2$ de la longitud de la fibra de acero.

Aparte de una correcta dosificación y conocer varios factores, los aditivos también cobran una relevancia importante en la docilidad del hormigón, y en el HRFA los más comunes son los reductores de agua y los superplastificantes, ya que el aumentar el agua deja de ser provechoso en el momento que se empieza a perjudicar la resistencia y durabilidad del hormigón, por esto es más útil actuar con aditivos, a pesar de que se pueda aumentar la docilidad del hormigón con aditivos, estos no por eso permiten que se pueda exceder la cuantía de fibras que tolera el hormigón porque hay otros motivos que restringen el uso de fibras como lo son el apelotonamiento y esto es independiente de los aditivos.

Si es que luego de tener una determinada cuantía de fibras y una granulometría acorde, sigue la falta de trabajabilidad, se puede deber a un bajo volumen de pasta, o una baja relación Agua libre/Cemento, aparte que las fibras rigidizan el hormigón a la hora de trabajarlo. Luego un bajo volumen de pasta se produce por poca agua y cemento por metro cúbico, es decir una mala dosificación. Por otro lado una baja relación Agua libre/Cemento, se puede dar por la absorción de los áridos disponibles en la mezcla, pudiéndose arreglar con aditivos sin afectar el comportamiento mecánico del hormigón, al menos mayormente.[4]

En un estudio experimental de HRFA cuyo objetivo es investigar el efecto conjunto del largo de fibra con el diámetro máximo de árido en la trabajabilidad y comportamiento mecánico del HRFA, se probaron 4 diámetros máximos de árido grueso de 10, 20, 30 40 [mm], con distintos largos de fibra de 30, 40, 50 y 60[mm], todas con 0.75[mm] de diámetro, donde también se usó un aditivo superplastificante con reductor de agua del 20% de eficiencia, además de esto se usaron dos niveles de resistencia, hormigón corriente con una relación Agua/Cemento de 0.58 y hormigón de alta resistencia con una relación Agua/Cemento de 0.33, se llegó a un total de 32 mezclas, expuestas en la figura(2.9).

Water/cement	Aggregate maximum size (mm)	Steel fiber length (mm)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)	Steel fiber (kg/m ³)
0.58	10/20/30/40	-	336	729	1189	195	0	0
0.58	10/20/30	30	336	750	1145	195	0	78.5
0.58	10/20/30	40	336	750	1145	195	0	78.5
0.58	20/30/40	50	336	750	1145	195	0	78.5
0.58	20/30/40	60	336	750	1145	195	0	78.5
0.33	10/20/30/40	-	521	632	1124	172	5.21	0
0.33	10/20/30	30	521	652	1080	172	5.21	78.5
0.33	10/20/30	40	521	652	1080	172	5.21	78.5
0.33	20/30/40	50	521	652	1080	172	5.21	78.5
0.33	20/30/40	60	521	652	1080	172	5.21	78.5

Figura 2.9: Listado de mezclas para el estudio.

Luego con esto se llevaron ensayos de asentamiento de cono, compresión sobre probetas cúbicas de $150[mm^3]$ y de flexión en viguetas de $150 \times 150 \times 700[mm]$, donde se hicieron ensayos de 3 y 4 puntos (3PBT y 4PBT).

Luego los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

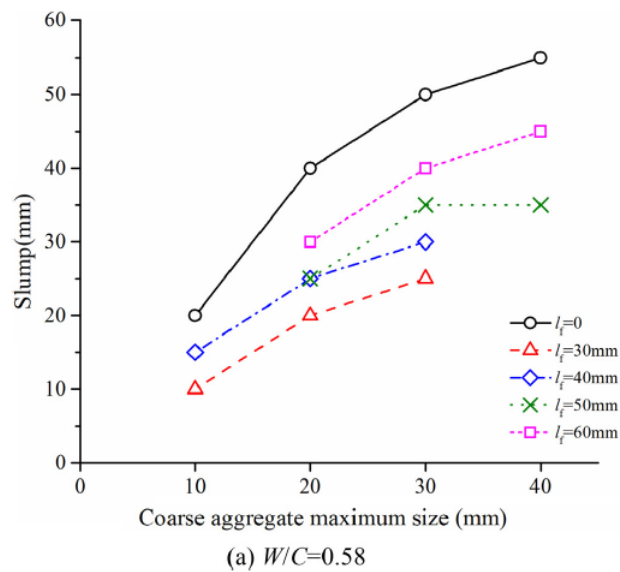
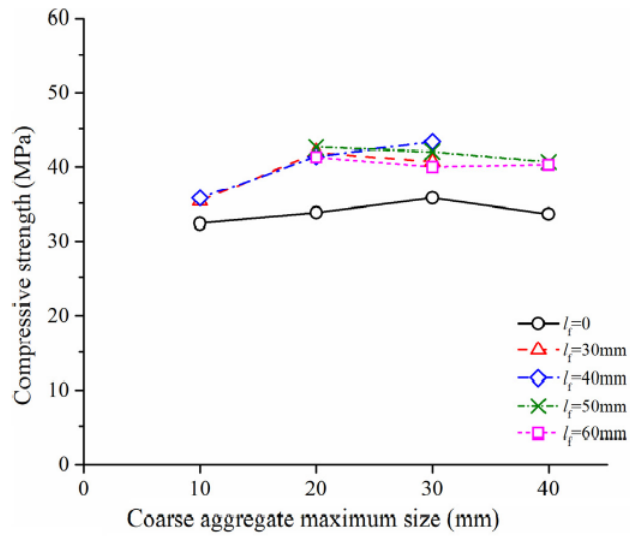
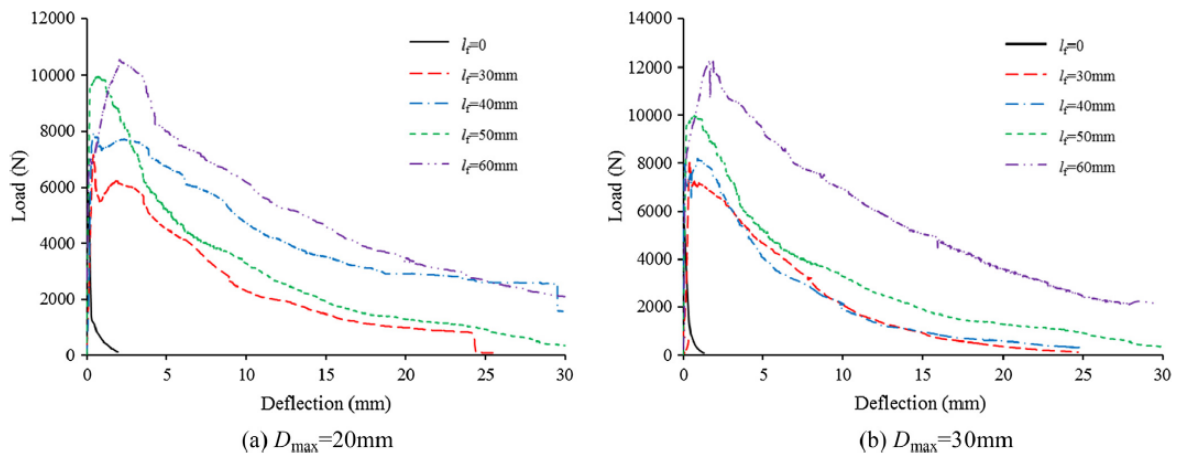


Figura 2.10: Relación entre el cono y el D_{max} de árido para cada largo de fibra.



(a) $W/C=0.58$

Figura 2.11: Relación entre la resistencia a compresión y el D_{max} de árido para cada largo de fibra.



(a) $D_{max}=20$ mm

(b) $D_{max}=30$ mm

Figura 2.12: Curva de carga-desplazamiento en ensayo de 3 puntos para D_{max} de 20 y 30[mm] del árido para distintos largos de fibra.

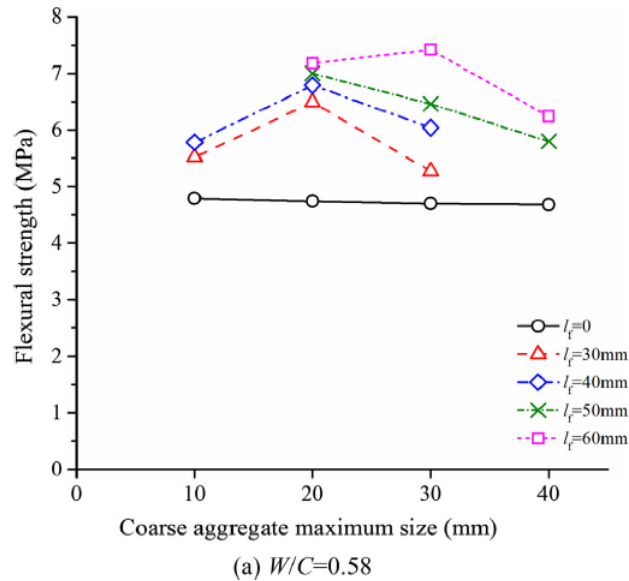


Figura 2.13: Relación entre resistencia a flexión y D_{max} de árido para cada largo de fibra.

Cabe mencionar que los resultados de los ensayos del estudio que se expusieron, fueron los de hormigón corriente (relación Agua/Cemento igual a 0.58), ya que estos son relevantes para este texto.

Luego a las conclusiones que se llegó, es que el asentamiento de cono se reduce un 50% para el HRFA en relación al hormigón sin fibras, luego tanto con el largo de fibra como con el tamaño del árido aumenta el asentamiento de cono, lo que se puede deber a que el mismo volumen de fibras en el HRFA equivale a un menor número de fibras lo que disminuye el apilamiento y el efecto que las fibras mismas tienen sobre la matriz, y en el caso del árido se debe a algo similar, y es que con el árido más grande hay menor cantidad de partículas pequeñas lo que disminuye el área específica, y por esto el cemento tiene que cubrir menos área del agregado grueso y fluye entre este lo que aumenta el asentamiento, luego cabe mencionar que el asentamiento de cono es una medida de la trabajabilidad del hormigón. Ver figura (2.10).

Luego la resistencia a compresión del HRFA llega a aumentar un 26% con relación al hormigón corriente, luego el aumento en la resistencia se ve solamente levemente afectado por el tamaño del árido, y el aumento de resistencia por la fibra se puede deber a la acción que ejercen las fibras sobre las microfisuras. Luego en el estudio se concluye que tanto la fibra como el árido no generan un gran aumento o variación de la resistencia a compresión. Ver figura (2.11).

Con respecto al ensayo de 3 puntos el estudio muestra que claramente existe una mejora del HRFA comparado con el hormigón sin fibras después de que el hormigón llega a su peak de resistencia, mostrando una curva dúctil, a diferencia del hormigón sin fibras que es frágil, lo que hace notar su efecto como refuerzo, luego el efecto de mejora aumenta como aumenta el largo de la fibra. Ver figura (2.12).

El estudio también muestra que la resistencia a flexión del HRFA aumenta un 58 % con respecto al hormigón sin fibras, lo que se puede deber a que después de que la matriz se fisura las fibras siguen tomando carga, esto hasta que la grieta pasa por la interfaz entre las fibras y la matriz, con respecto al agregado grueso, este genera un aumento en la resistencia a flexión hasta 20[mm] de D_{max} , luego decrece, esto se debe a la relación entre el largo de la fibra y el D_{max} del árido. Ver figura (2.13).[5]

2.4. Ensayos

Acorde a la sección 3.5.8 de la ACI-318 (2011), las fibras de acero debieran tener una relación de aspecto (l_f/D_f) mayor a 50, sin embargo, debe ser menor que 100, aunque no existen limitaciones acerca de su forma, es decir, pueden ser lisas, con gancho o con alguna otra geometría. Luego en un estudio que entre otras propiedades estudiaba el módulo de elasticidad y la flexión se hicieron ensayos de 4 puntos para estudiar esta propiedad y tenía la siguiente configuración.

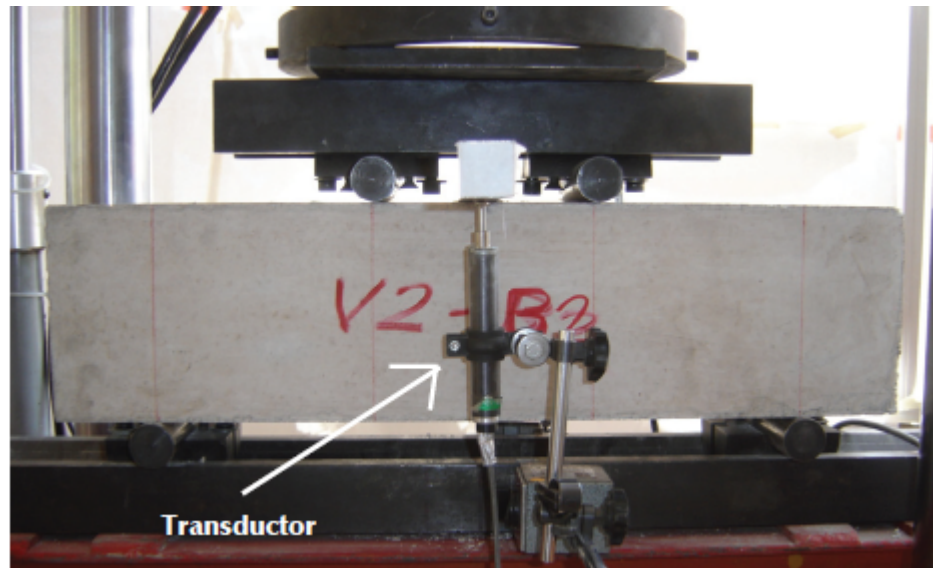


Figura 2.14: Configuración de ensayo de 4 puntos.

Para practicar los ensayos se utilizaron máquinas servo hidráulicas con capacidad de $\pm 2000[kN]$. De los ensayos se concluyó que la resistencia al agrietamiento por flexión y su deformación unitaria asociada, no varían mucho al aumentar el contenido de fibras, ya que estas empiezan a actuar después del tramo elástico, también se observó que la tenacidad y las resistencias residuales aumentaron significativamente a medida que se aumentaba el contenido de fibra.

En el mismo estudio para estudiar el módulo de elasticidad se tenía la siguiente configuración.

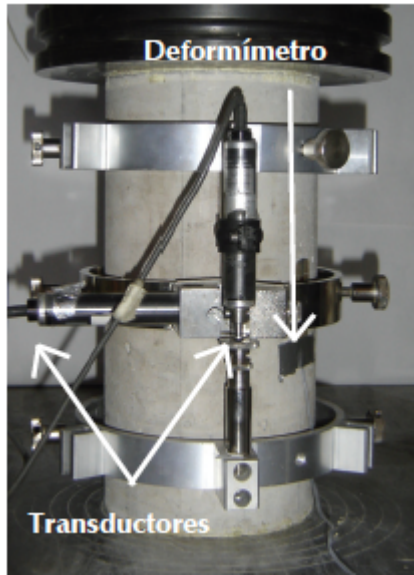


Figura 2.15: Configuración de ensayo de elasticidad.

De este ensayo se corroboró que el módulo de elasticidad disminuye a medida que se incrementa el contenido de fibras de acero, lo que sucede por el agregado grueso y por el aumento de aire en la mezcla, lo que disminuye la adherencia entre la matriz y las fibras de acero, el aire posiblemente entre en el mezclado de las fibras. Por otro lado las fibras generan un efecto de confinamiento al hormigón en compresión.[9]

Mientras que los ensayos de 4 puntos (4PBT) están normalizados por la norma ASTM C1609 de Estados Unidos, los ensayos de 3 puntos (3PBT) están normalizados por Europa por la norma EN 14651, y ambos son métodos indirectos válidos para caracterizar a flexión en hormigón reforzado con fibras de acero. Luego los ensayos de 3 puntos están normalizados para viguetas de 600x150x150 [mm] con los apoyos situados a 500[mm] y con una carga central, aparte con un sacado inducido de 5[mm] de ancho y 25[mm] de profundidad, mientras que lo que se mide es la apertura de grieta en milímetros, también tiene su equivalencia en caso de que se midiera deflexión.

Luego así se ven dos curvas comunes de ensayos a 3 y 4 puntos.

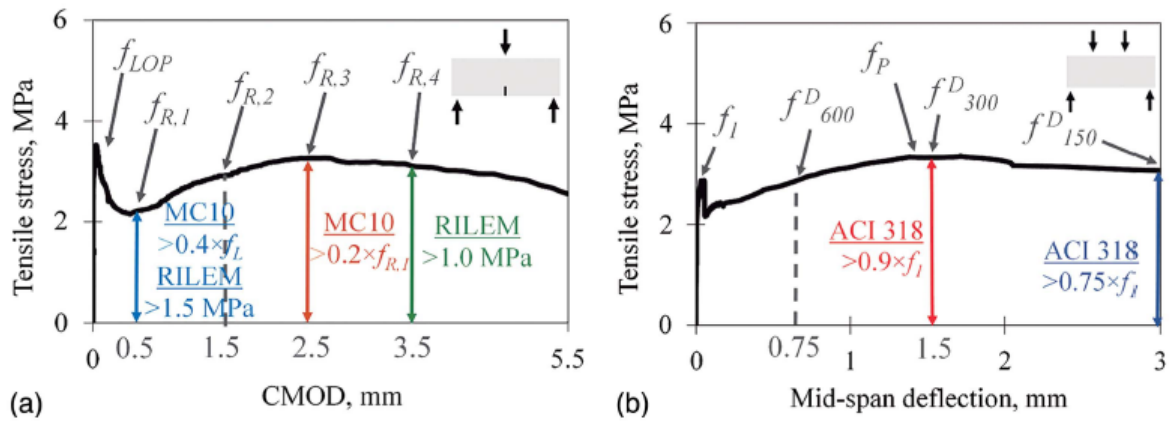


Figura 2.16: Ensayos de 3 y 4 puntos respectivamente.

Luego así es la configuración:

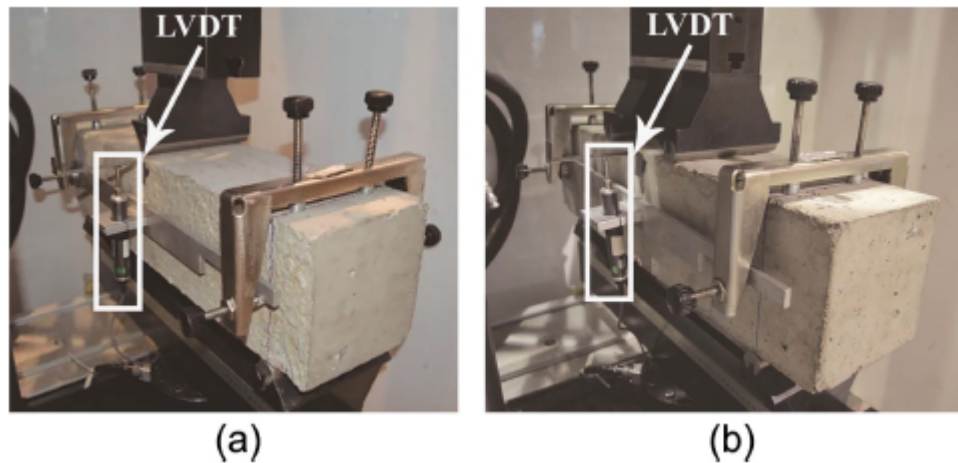


Figura 2.17: Configuración de los ensayos de 3 y 4 puntos respectivamente (a y b).

Luego en este estudio se ensayaron viguetas tanto en 3 puntos como en 4 puntos, y se dividieron en tres cuantías de fibra, 20,40 y 60 $[kg/m^3]$, y los resultados de este estudio mostraron que los ensayos de 3 puntos en viguetas mostraban una resistencia residual hasta un 66% más alta que su símil de 4 puntos a medida que aumentaba la resistencia residual.[6]

La norma EN 14651 que normaliza los ensayos de 3 puntos, desde las medidas de las viguetas en adelante, está diseñado para medir para medir la apertura de grieta (CMOD), pero también tiene una versión del ensayo normalizada para medir deflexiones y la configuración típica es la siguiente:

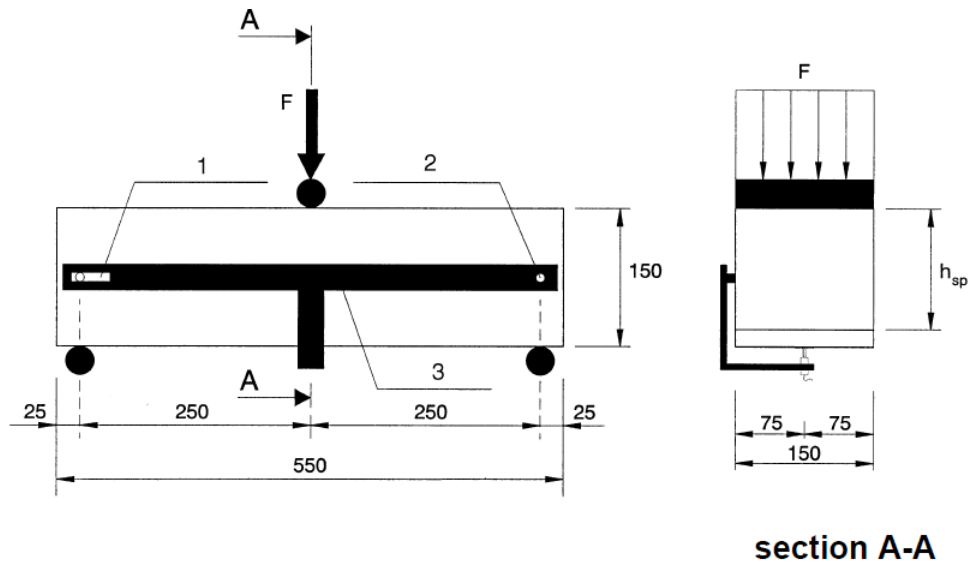


Figura 2.18: Configuración del ensayo de 3 puntos para medir deflexiones

Donde se consta de un marco rígido entre los extremos de la vigueta, donde a la altura de los apoyos hay un apoyo deslizante y uno rotatoria, luego en el centro del vano, hay una placa de aluminio de 1[mm] de espesor y un transductor LVDT que mide las deformaciones. Cabe mencionar que esta es una configuración tipo.

Esta norma también menciona que la velocidad del ensayo debe ser de 0.05 [mm/min] hasta que el valor de la apertura de grieta sea de 1[mm] y luego debe tener una velocidad de 0.2[mm/min]. Para transformar la apertura de grieta a deflexión se tiene la siguiente relación:

$$\delta = 0.85CMOD + 0.04[mm] \quad (2.1)$$

La tensión se mide de la siguiente manera:

$$f_{fl} = \frac{3F \cdot l}{2bh_{sp}^2} \quad (2.2)$$

Donde la tensión está en [MPa] y:

- F es la carga.
- l es el largo entre los apoyos de la vigueta.
- b es el ancho de la vigueta.
- h_{sp} es la distancia entre la parte superior del sacado y la cara superior.

Se tienen los siguientes parámetros de importancia, como es el límite de proporcionalidad, σ_y es la tensión máxima que ocurre antes de un valor de apertura de grieta de 0.05. Y de igual importancia, se tienen las tensiones residuales, definidas como:

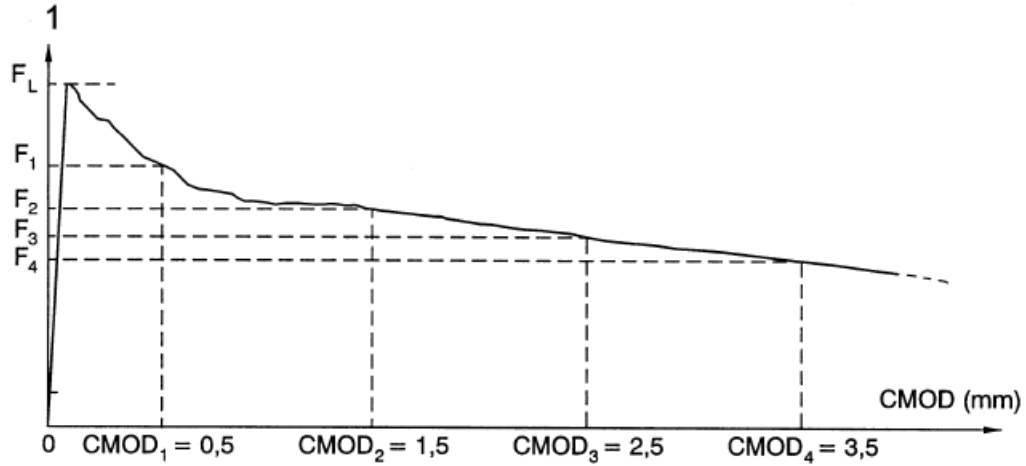


Figura 2.19: Definición de las tensiones residuales (1,2,3,4).

[8]

2.5. Modelación

2.5.1. Comportamiento a flexión

Usando los datos experimentales obtenidos en el estudio del comportamiento flexural a partir de ensayos de 3 puntos (Figura 2.21), aparte del estudio de modelos para calcular la tensión residual, en este estudio se propuso una forma de calcular las tensiones residuales ya que son de suma importancia en el HRFA. el modelo que se propuso es el siguiente:

$$f_{R,i} = A_i \cdot (V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} + N^B) \cdot \sqrt{f_u \cdot f_c} \quad (2.3)$$

Donde $f_{R,i}$ es la tensión residual, A_i es un parámetro que se debe calibrar, V_f es la cuantía volumétrica de fibra, $\frac{l_f}{d_f}$ es la relación de aspecto, N es el número de ganchos, B es otro parámetro que se debe calibrar, f_u es la resistencia a tracción de las fibras, y f_c es la resistencia a compresión. Luego para este estudio se llegó a que $B=3$ a partir de parámetros estadísticos, y A varía dependiendo de que tensión residual se calcule (ver figura 2.19) y esta calibración se hizo despejando A y usando el valor de tensiones residuales de distintos modelos, se llegó a $f_{R,1,2,3,4} = \{(1/2000), (1/1800), (1/1900), (1/2100)\}$ en su valor promedio. Luego este modelo es una herramienta práctica para estimar la tensión residual, que en mucho de los modelos dependen de parámetros complejos, y en este caso, depende casi únicamente de la geometría y propiedades mecánicas que pueden ser conocidos de forma previa, aparte de un par de parámetros estadísticos que se tienen que utilizar para llegar al modelo, donde presenta una coeficiente de correlación (r) cercano al 90 %, luego para transformar en algo con un 95 % de confianza solo se debe reducir un poco el valor a partir del parámetro A . Para hacer este modelo se tomaron cerca de 256 datos de ensayos aparte de modelos y más.[7]

2.6. Resultados esperados

2.6.1. Ensayo de 3 puntos

En un estudio donde se buscaba caracterizar el comportamiento del HRFA, se usaron distintas fibras en distintas cuantías, en ensayos de 3 puntos según la norma EN 14651, al igual que las fibras Dramix se usaron fibras con 1, 1.5 y 2 ganchos.




Shape			
Hooked ends	1	1.5	2
l_f , mm	60	60	60
d_f , mm	0.9	0.9	0.9
l_f/d_f	65	65	65
f_u , MPa	1160	1500	2300
E_f , MPa	210,000	210,000	210,000

Figura 2.20: Características de las fibras utilizadas en el estudio.

Luego ahí se describen aparte del número de ganchos, el largo, el diámetro, la relación de esbeltez, la tensión máxima y el módulo de elasticidad respectivamente.

Luego en los ensayos se usaron cuantías de 20, 40 y 60[kg/m^3], esto ya que si bien la ACI 318 recomienda usar desde 60[kg/m^3] para reemplazar las fibras por el uso de estribos, la norma EN 14889-1 establece que las tensiones residuales f_{R1} y f_{R4} tienen que ser mayores a 1.5 y 1[MPa] respectivamente (ver figura 2.19), lo que el fabricante dice que se logra con una dosis de 15[kg/m^3]. Luego los estudios experimentales mostraron los siguientes resultados.

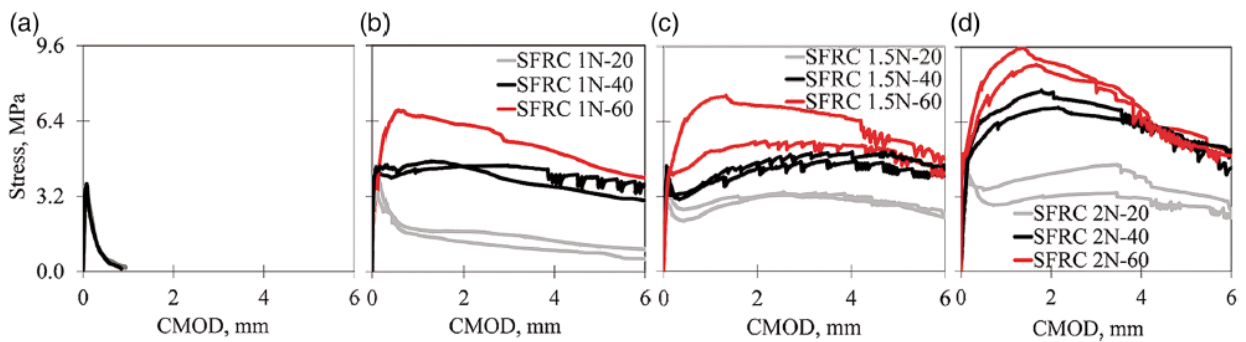


Figura 2.21: Resultados de los ensayos a 3 puntos.

Donde 1N, 1.5N y 2N hace alusión al número de ganchos de la fibra y 20, 40 y 60 a la cuantía de fibra. Luego los resultados de tensión en el límite de proporcionalidad (mayor tensión antes de una apertura de grieta de 0.05[mm]) y las tensiones residuales son las siguientes para las fibras con 1 gancho.

Nomenclature	PC	SFRC 1 N-20	SFRC 1 N-40	SFRC 1 N-60
Hooked ends	0	1		
$V_f \times (l_f/d_f)$	0	16.89	33.95	53.82
f_{LOP} , MPa	3.68 (1.8%)	3.93 (19.8%)	4.38 (1.9%)	5.06 a
$f_{R,1}$, MPa	0.54 (6.5%)	2.09 (5.7%)	4.19 (4.6%)	6.79 a
$f_{R,1}/f_{LOP}$	b	0.54 (14.2%)	0.96 (6.5%)	1.34 a
$f_{R,2}$, MPa	b	1.57 (13.7%)	4.53 (4%)	6.42 a
$f_{R,3}$, MPa	b	1.41 (25.6%)	4.36 (4.3%)	6.08 a
$f_{R,3}/f_{R,1}$	b	0.67 (20.1%)	1.04 (8.9%)	0.90 a
$f_{R,4}$, MPa	b	1.22 (27.6%)	4.06 (12%)	5.39 a

Figura 2.22: Resultados del ensayo de 3 puntos.

Con esto se puede observar como colaboran en la resistencia las fibras después del tramo elástico, y es el comportamiento esperado cuando se realicen los ensayos de 3 puntos.[7]

Capítulo 3

3. Metodología experimental

Para conocer las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) se desarrollarán ensayos a tracción, compresión y flexión, los primeros dos se llevarán a cabo en probetas cilíndricas, mientras que los ensayos a flexión se realizarán en viguetas y será un ensayo de 3 puntos donde se tienen dos apoyos y una carga central equidistante de ambos apoyos.

Luego el procedimiento para llegar a los ensayos se describen a continuación, desde los materiales hasta los mismos ensayos.

3.1. Materiales

A lo largo del procedimiento experimental se utilizaron distintos materiales, la mayoría asociados a la construcción de las probetas de HRFA, ya sea cilíndricas o las viguetas, sin embargo, también hubieron materiales involucrados en los ensayos mismos, a continuación se expondrán estos materiales, con una descripción de su función y apoyo gráfico cuando sea necesario.

Luego para la realización de las probetas los materiales fueron los siguientes:

1. Hormigón y HRFA:

- Arena fina: arena que en su mayoría pasa la malla #40 (diámetro menor a 0.5[mm]) y que no pasa la malla #200 esto para tamices ASTM. Se usó de la marca "Río Maipo".
- Arena gruesa: arena que en su mayoría pasa la malla #4 (diámetro menor a 5[mm]) y que no pasa la malla #200 esto para tamices ASTM. Se usó de la marca "Río Maipo".
- Gravilla: Árido que es su mayoría pasa la malla 3/4" y no pasa la malla #4. Se usó de la marca "Río Maipo".
- Cemento Puzolánico (grado corriente según la NCh 148). Se usó de la marca "Polpaico".
- Fibras de acero. Se describirán más adelante.
- Agua.

- Aditivo plastificante marca "sika", y del tipo visconcrete 5100.
Luego los anteriores son materiales propios de la mezcla de hormigón, el resto de los materiales y herramientas igual de necesarios, pero que no tienen que ver con la mezcla son los siguientes:
- Tubos de PVC sanitarios plomos, de 110[mm] de diámetro exterior: se usó para los moldes de las probetas cilíndricas.
- Tapas de PVC sanitarios plomas para tubos de PVC de 110[mm]: se usaron de tapas para los moldes de las probetas cilíndricas.
- Silicona y pistola calafatera: la pistola se usó para aplicar la silicona en el borde exterior de los moldes de las probetas cilíndricas para evitar el desprendimiento de la tapa y la filtración de agua o mezcla de los moldes.
- Desmoldante: Se usó para aplicar en los moldes de viguetas prismáticos de acero. Se usó de la marca "TOPEX" para aplicarse en acero.
- Molde prismático de acero para las viguetas, que se mostrará más adelante.
- Pesa digital con capacidad hasta 50[kg] para los aridos y el cemento.
- Pesa gramera o de cocina con capacidad hasta 10[kg] para el agua y las fibras de acero.
- Mezclador de cemento para revolver y hacer la mezcla de hormigón.



Figura 3.1: Mezclador de cemento.

- Balde de aproximadamente 100[l] para mezclar el hormigón.
- Barra de hierro de 40[cm] aproximadamente, que se utilizó para vibrar manualmente el hormigón.
- Guantes de abañilería.

- Antiparras.
- Pailas.
- Palas

2. Ensayos:

- Máquina Universal: aquí se realizarán todos los ensayos, y esta máquina se configurará según el ensayo que se esté realizando. Se expondrán imágenes más adelante.
- Adhesivo epóxico bifásico: se utilizó para adherir los extremos de la probeta a los discos que disponían de un vástago para introducirse en la mordaza de la máquina que ejerce la tensión en el ensayo a tracción y esta se pueda transmitir a las probetas cilíndricas. Se usó el adhesivo Sikadur 31 de la marca "Sika".



Figura 3.2: Adhesivo epóxico

- Adhesivo de cianoacrilato: es un adhesivo instantáneo de baja viscosidad que se utilizó para fijar los sensores LVDT en los ensayos de tracción y flexión. Se utilizó bajo la marca comercial de "Loctite 495".



Figura 3.3: Adhesivo de cianoacrilato.

- Transductor LVDT: Es un transductor de desplazamientos lineales en base a voltaje que se utilizó para el tramo elástico de los ensayos donde hay pequeñas deformaciones y donde se necesita más sensibilidad que la de la máquina universal que es a deformación controlada.



Figura 3.4: LVDT

3.1.1. Fibras de acero

La fibra de acero que será parte de la matriz de hormigón para conformar hormigón reforzado con fibras de acero, tiene el nombre comercial de fibra Dramix 3D 65/35 BG. Que corresponde a fibras de acero con medio gancho, con una relación de esbeltez de 65(largo/diámetro), con un largo de 35[mm] y un diámetro de 0.55[mm], son de acero brillante y vienen encoladas para formar una placa con las fibras lo que mejora su manejo, dicho pegamento es soluble en agua, lo que ayuda a que cuando se introduzcan en la mezcla se separen y queden como fibras individuales distribuidas homogéneamente en la mezcla. Luego su aspecto y propiedades son las siguientes.



Figura 3.5: Fibra Dramix 3D

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de las fibras Dramix 3D.

Resistencia a tracción (F_y) [MPa]	Modulo de Young (E) [MPa]	Densidad [kg/m^3]	Deformación máxima a tracción
1.345	200.000	7.850	0.8 %

3.2. Granulometría

La granulometría es un procedimiento necesario para saber como está graduado el árido con el que se trabajará, cual será el diámetro máximo con el que se trabajará, el árido presente en la mezcla.

Luego para poder hacer la granulometría desde una gran cantidad de árido de distintos sacos, pero de igual origen para que sea representativa se debe hacer algo llamado cuarteado, este procedimiento se realiza tanto para la arena fina como para la arena gruesa, y consiste en lo siguiente:

- Se vierte todo el árido en una superficie limpia.
- Se mezcla y forma un cono invertido.
- Desde dos esquinas opuestas determinadas por la cruz se procede a almacenar en un recipiente.
- Se vuelve a mezclar y hacer el cono invertido y almacenar de las esquinas opuestas, iterativamente hasta que todo el árido esté almacenado.



Figura 3.6: Cruz en el árido



Figura 3.7: Extracción de las dos esquinas



Figura 3.8: Tambor donde se almacena el árido tapado.

Luego de esto el secado de muestra se hizo según la norma ASTM C-136, dejando la muestra representativa de cada árido a excepción de la gravilla en un horno a temperatura constante de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}C$ por un día completo. Luego a partir del resultado y de la variación del peso se puede cuantificar la humedad y con esto calibrar mejor la dosificación de agua en el hormigón.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.2: Humedad en la arena fina.

	Muestra 1 [g]	Muestra 2 [g]	Muestra 3 [g]
Peso húmedo	621	750	828
Peso seco	592	714	788
Humedad [%]	4.7	4.8	4.8
	Humedad promedio [%]		4.8

Tabla 3.3: Humedad en la arena gruesa.

	Muestra 1 [g]	Muestra 2 [g]	Muestra 3 [g]
Peso húmedo	1092	1154	1136
Peso seco	1044	1101	1086
Humedad [%]	4.4	4.6	4.4
	Humedad promedio [%]		4.5

Después con la muestra seca se procedió según la norma ASTM C-136 a hacer la granulometría con los áridos y un juego de tamices, el procedimiento es el siguiente:

1. Se apilan 1 sobre otro los tamices donde el superior corresponde a la mayor apertura de malla y el inferior a la menor apertura de malla, situándose abajo un receptáculo.

2. Se tamiza desde el primer tamiz donde queda retenido el material y se agita hasta que no pase ninguna partícula.
3. Se pesa el contenido retenido.
4. Se repite el procedimiento con los tamices inferiores hasta que ya no pase árido.

Esto se realizó para las siguientes muestras:

Tabla 3.4: Muestras de árido.

Gravilla [g]	Arena fina [g]	Arena gruesa [g]
5000	500	500

Los tamices tienen la siguiente apertura de malla en orden descendente:

Tabla 3.5: Rótulo y apertura de malla.

Rótulo del tamiz	Apertura de malla [mm]
3/4"	19
1/2"	12.5
3/8"	9.5
#4	4.75
#8	2.36
#10	2
#30	0.6
#40	0.425
#50	0.3
#100	0.150
#200	0.075

Luego la granulometría arrojó lo siguiente, se tomará desde el primer tamiz que retiene partículas:

Tabla 3.6: Granulometría árido fino.

Rótulo de Tamiz	Apertura de malla [mm]	Peso [g]	% acumulado Retenido	% Pasa
#4	4.75	15	3 %	97 %
#8	2.36	12	5 %	95 %
#10	2	3	6 %	94 %
#30	0.6	12	9 %	91 %
#40	0.425	11	11 %	89 %
#50	0.3	29	17 %	83 %
#100	0.15	202	58 %	42 %
#200	0.075	162	90 %	10 %
Fondo	-	47	100 %	0 %

Tabla 3.7: Granulometría árido grueso.

Rótulo de Tamiz	Apertura de malla [mm]	Peso [g]	% acumulado Retenido	% Pasa
#4	4.75	70	14 %	86 %
#8	2.36	123	39 %	61 %
#10	2	32	45 %	55 %
#30	0.6	154	76 %	24 %
#40	0.425	35	83 %	17 %
#50	0.3	26	89 %	11 %
#100	0.15	34	96 %	4 %
#200	0.075	17	99 %	1 %
Fondo	-	5	100 %	0 %

Tabla 3.8: Granulometría gravilla.

Rótulo de Tamiz	Apertura de malla [mm]	Peso [g]	% acumulado Retenido	% Pasa
3/4"	19	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 %

Con esto la curva granulométrica queda como:

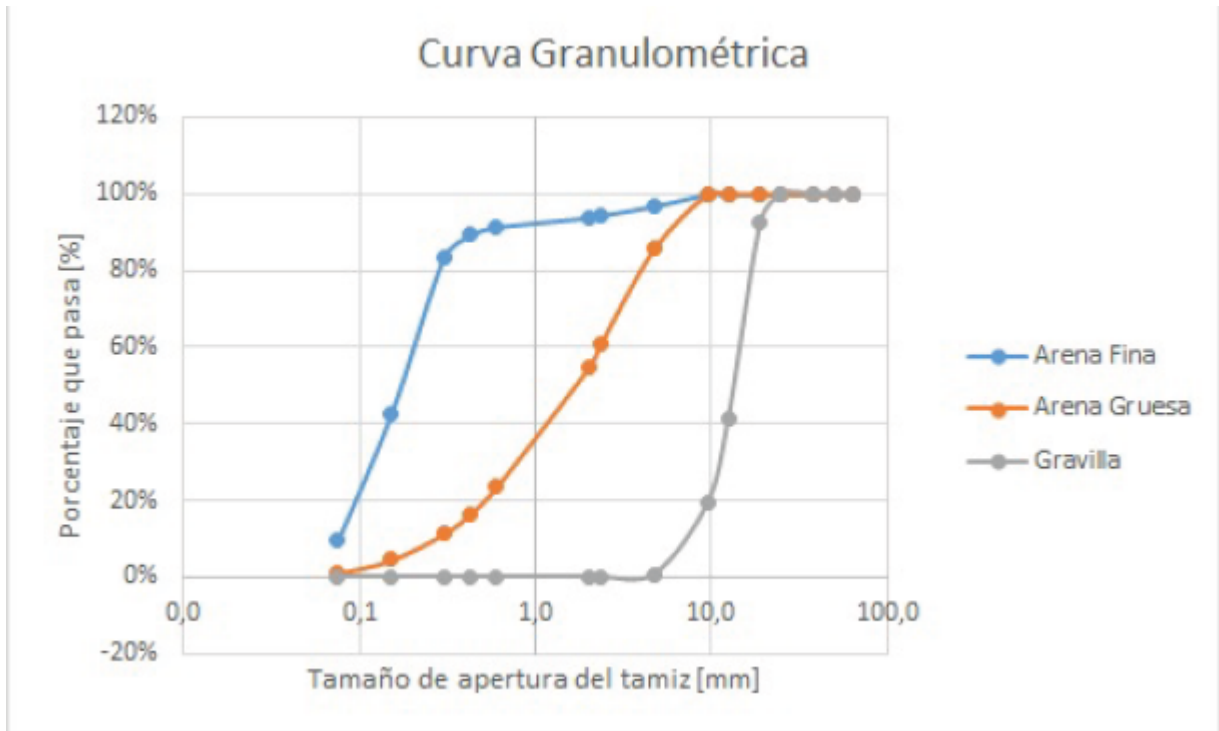


Figura 3.9: Granulometría de todos los áridos.

Luego el procedimiento de forma más gráfica:



Figura 3.10: Rotulado de las muestras.



Figura 3.11: Horno.



Figura 3.12: Pesado de las muestras.



Figura 3.13: Tamizado de las muestras.

3.3. Probetas

Las probetas para los ensayos se distinguieron entre ellas según distintos parámetros para poder hacer comparaciones y optimizar el uso de las fibras, además, apreciar la real función de las fibras.

Para la fabricación de las probetas se consideraron 2 mezclas, una mezcla con árido grueso, es decir, diámetro máximo (D_{max}) de 19[mm] y otra con árido un poco más fino, con D_{max} de 4.75[mm]. Se le asociará el nombre de mezcla 1 (M1) a la con D_{max} de 19[mm] y de mezcla 2 (M2) a la D_{max} de 4.75[mm].

Luego estas dos mezclas tendrán distinta dosificación, distinta relación agua/cemento, y cada mezcla contará con 3 cuantías de fibra, de 0 %, 0.5 % y 1 %.

La dosificación a utilizar es la siguiente:

Tabla 3.9: Dosificación para la mezcla 1 y mezcla 2.

Mezcla	Cemento [kg/m ³]	Agua [kg/m ³]	Gravilla [kg/m ³]	Arena gruesa [kg/m ³]	Arena fina [kg/m ³]	Plastificante [L/m ³]	A/C
M1	796	405.9	980	637	477	3.66	0.51
M2	796	493.5	-	1197	898	3.66	0.62

Las cuantías de fibras de acero usadas fueron las siguientes:

Tabla 3.10: Cuantías de acero a utilizar.

Cuantía volumétrica de fibra %	Cuantía en [kg/m ³]
0.5	39.3
1	78.5

Con esta dosificación se hicieron 36 probetas cilíndricas y 12 viguetas prismáticas, con las siguientes dimensiones:

Tabla 3.11: Dimensiones de las probetas.

Forma de la probeta	Ancho/Diámetro [mm]	Alto [mm]	Largo [mm]
Cilíndrica	105	210	-
Vigueta	150	150	530

Estas se distribuyeron de la siguiente manera, por mezcla y cuantía:

Tabla 3.12: Probetas cilíndricas.

Cuantía de fibra	M1	M2
0 %	6	6
0.5 %	6	6
1 %	6	6
	Total	36

Tabla 3.13: Viguetas.

Cuantía de fibra	M1	M2
0 %	2	2
0.5 %	2	2
1 %	2	2
	Total	12

3.3.1. Construcción de las probetas cilíndricas

La primera parte de la construcción de las probetas cilíndricas es la confección de moldes acordes, esto se realizó con los tubos de PVC descritos en los materiales y las tapas, donde:

1. Se dimensionaron los tubos de PVC de 110[mm] de diámetro exterior en tubos de 210[mm].
2. Se le pusieron las tapas, de PVC.
3. Se selló exteriormente la unión con silicona y una pistola calafatera.

Donde quedó:



Figura 3.14: Molde de la probeta cilíndrica

Una vez con los moldes, se puede proceder con la construcción de las probetas, es decir, hormigonar, esto se realizó en el laboratorio MECESUP de la facultad de ciencias físicas

y matemáticas de la universidad de Chile, y cuyo procedimiento se realiza de la siguiente manera:

1. Acorde a la dosificación especificada en la tabla 3.9, las dimensiones de los moldes, y el tamaño del recipiente donde se hormigonará que es de aproximadamente 110[l], se pesa el agua, el cemento, la arena fina, la arena gruesa, y la gravilla y las fibras de acero cuando corresponda. El plastificante luego se mide con una jeringa, donde inmediatamente se introduce al agua y se revuelve.
2. Luego se vierte parte importante del agua en el balde, se agregan los áridos y el cemento y se revuelve con el mezclador (ver Figura 3.1) hasta obtener una pasta lo más homogénea posible luego se agrega el agua faltante y se sigue revolviendo para obtener una mezcla trabajable.
3. Luego se procede a agregar las fibras de acero cuando corresponda, de forma gradual hasta que se integren completamente. Cabe mencionar que estas fueron previamente separadas usando agua, ya que se desconocía la capacidad mecánica del mezclador para separar las fibras y distribuirlas en la mezcla.
4. Una vez obtenida una mezcla trabajable y con las fibras bien distribuidas, se vierte el hormigón en los moldes de la figura 3.14 en 3 capas, siendo cada capa vibrada manualmente con un fierro, introduciendo el fierro en la mezcla para eliminar las burbujas y luego golpeando el molde 25 veces, en tandas de 5 golpes y luego girando este mismo hasta haber realizado los 25 golpes. La última capa se evita que quede con remanentes de hormigón por encima del nivel del molde, así que se nivela lo máximo posible deslizando un fierro al ras del molde.
5. Luego se sella la probeta con papel film en la parte superior del molde para evitar la pérdida de humedad, luego se rotula la probeta con el tipo de mezcla, la cuantía de fibra y la fecha de fabricación, y se posiciona en un mesón dispuesto para dejar fraguando las probetas hasta que pasen más de 28 días de fraguado.
6. Pasando los 28 días necesarios para el fraguado se pueden desmoldar, esto se hace retirando la silicona con un destornillador, afirmando la probeta longitudinalmente y retirando la tapa, luego de esto, en la misma prensa, se procede a hacer un corte en diagonal con una sierra hasta cortar el molde en su totalidad para desprenderlo.



Figura 3.15: Probeta cilíndrica después de hormigonar.

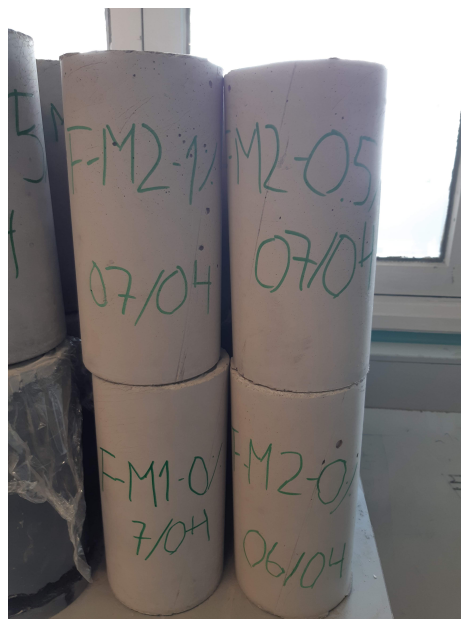


Figura 3.16: Probeta cilíndrica después de desmoldada.

3.3.2. Construcción de las viguetas

Para la construcción de las se procede de igual manera, para los 3 primeros pasos a la hora de hormigonar, sin embargo, existen pequeñas diferencias a la hora del vibrado, el fraguado y el desmolde:

1. Al menos dos horas antes del hormigonado se debe aplicar el desmoldante en las caras interiores del molde prismático.
2. El vibrado nuevamente se hace en 3 capas, pero ahora se realizan 50 golpes, 25 golpes por cada mitad a lo largo del molde. Luego se realiza lo mismo que con las probetas cilíndricas con el remanente de hormigón se realiza el mismo nivelado.
3. Luego se deja fraguar con la cara superior a la intemperie en el laboratorio MECE-SUP, luego en esa cara se escribe el rótulo análogo a las probetas cilíndricas. Como la disponibilidad de los moldes prismáticos es por un tiempo limitado, luego de 7 días se desmoldan sin embargo, durante todos los días de los 28 se riegan las caras que se encuentren a la intemperie.
4. El desmolde se realiza con llaves inglesas, ya que los moldes son armables y sus partes están unidas por pernos.



Figura 3.17: Molde prismático después de aplicado el desmoldante.

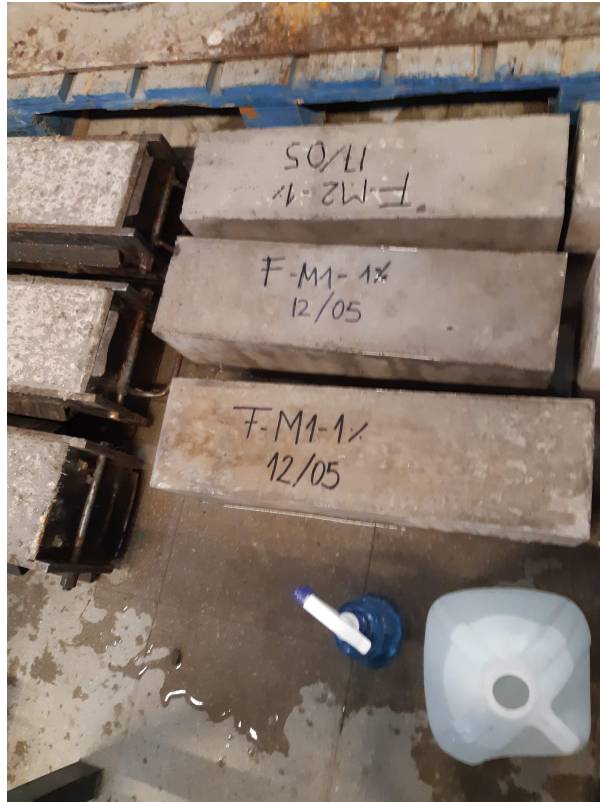


Figura 3.18: Vigueta en el proceso de regado.

3.4. Ensayos

3.4.1. Ensayos a tracción

Los ensayos en probetas cilíndricas se hicieron en la máquina universal de marca Instron y modelo 600LX. Luego las probetas que fueron ensayadas en tracción se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 3.14: Probetas ensayadas a tracción.

Mezcla/Cuantía	0 %	0.5 %	1 %
M1	3	2	2
M2	3	2	2
		Total	14

El procedimiento para ensayar estas probetas se realizó de la siguiente manera:

1. Primero se debe configurar la máquina universal en tracción.
2. Se debe adherir la probeta a dos discos de aluminio de gran grosor, esto se hace usando el epóxico sikadur-31, el epóxico se aplica en ambos extremos de la probeta, luego se aplica en el borde generado entre el disco y la probeta y se hace un filete de aproximadamente 3 centímetros de alto en la probeta. Para que la probeta quede nivelada se usan 3 fierros lisos de igual tamaño que se conectan en los discos opuestos. Luego el epóxico requiere un curado de al menos 24 horas.
3. Luego con la ayuda de unos vástagos con un hilo para apernar que se colocan en las mordazas de la máquina universal se coloca la probeta.
4. Finalmente se colocan los transductores LVDT, adheridos a través de una base de madera a los extremos de la probeta con cianoacrilato.
5. Finalmente las mordazas aprietan los vástagos y se pretensiona la probeta para dar inicio al ensayo a tracción.



Figura 3.19: Máquina configurada en tracción.



Figura 3.20: Probeta adherida a los discos de aluminio.

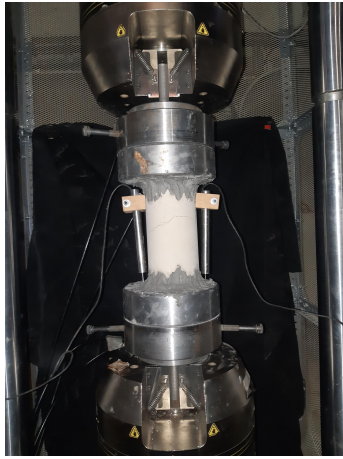


Figura 3.21: Probeta en tracción.



Figura 3.22: Falla correcta de la probeta.



Figura 3.23: Falla incorrecta de la probeta.

3.4.2. Ensayos a compresión

Los ensayos en probetas cilíndricas se hicieron en la misma máquina universal. Luego las probetas que fueron ensayadas en compresión se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 3.15: Probetas ensayadas a compresión.

Mezcla/Cuantía	0 %	0.5 %	1 %
M1	3	2	2
M2	2	2	2
		Total	13

El procedimiento para ensayar estas probetas se realizó de la siguiente manera:

1. Primero se debe configurar la máquina universal en compresión.
2. Luego se nivelan las probetas en sus dos caras, esto se hizo en el IDIEM, por otras personas y con una máquina rectificadora.
3. Se debe colocar un anillo que va atornillado a la probeta y que tiene incorporado los dos transductores LVDT y que por ende deja la probeta lista para ser ensayada, luego se coloca en posición para ensayarse.
4. Finalmente se precarga la máquina universal y se da inicio al ensayo.



Figura 3.24: Rectificadora con la que se nivelaron las caras de la probeta.

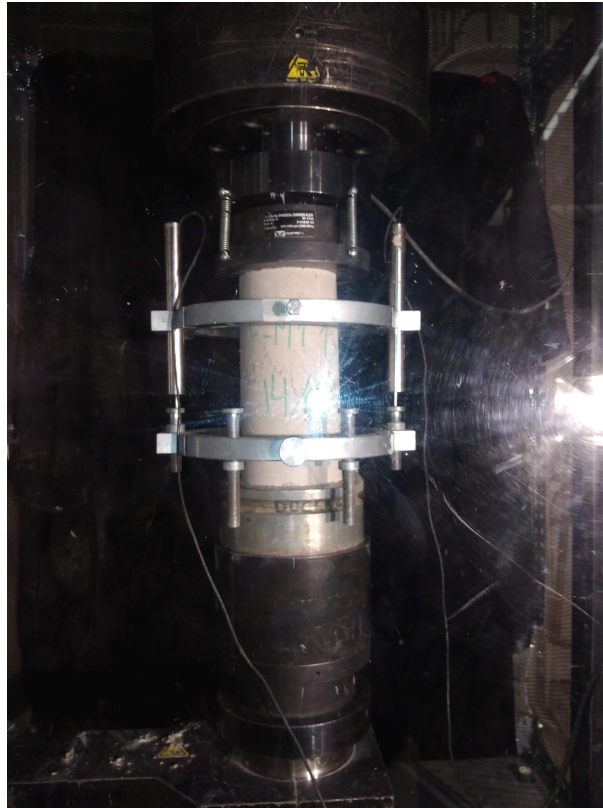


Figura 3.25: Configuración de probeta en compresión lista para ensayar.

3.4.3. Ensayos a flexión

Los ensayos en viguetas se hicieron en la misma máquina universal. Luego las viguetas que fueron ensayadas en ensayos de 3 puntos se distribuyeron de la siguiente manera:

Tabla 3.16: Viguetas ensayadas en 3 puntos.

Mezcla/Cuantía	0 %	0.5 %	1 %
M1	2	2	2
M2	2	2	2
		Total	12

El procedimiento para ensayar estas probetas se realizó de la siguiente manera:

1. Primero se configura la máquina universal para realizar ensayos en flexión, esto requiere de varias personas y de utilizar un teclé pluma para mover las piezas de hierro que son utilizadas para colocar los apoyos, una vez instaladas estas piezas, se colocan los apoyos en la parte inferior a 40[cm] de distancia entre ellos y en el centro se coloca el punto de carga superior.
2. Se coloca la vigueta lo más centrada posible, y con imanes mecánicos como base para los transductores LVDT se adhieren estos y se colocan en la posición del punto de carga, luego se colocan dos bases de madera al centro de la vigueta para que capte las deformaciones de los LVDT.

3. Se precarga la vigueta y se da inicio al ensayo.



Figura 3.26: Configuración de la vigueta en ensayo de 3 puntos.



Figura 3.27: Ubicación de las bases de madera en la vigueta en ensayo de 3 puntos.

3.4.4. Resumen de las probetas fabricadas.

Ahora se detallarán datos importantes de las probetas, como su fecha de fabricación, su fecha de ensayo, su tipo de ensayo en el caso de las probetas cilíndricas, y el tiempo de fraguado de cada probeta o vigueta. Cabe mencionar que en el caso de las probetas cilíndricas, se dejaron algunas de reserva que pudieron haberse usado en caso de que alguna fallara de

forma distinta a la que se busca, lo que perjudicaría su análisis, en el caso de las viguetas no se hizo esto ya que las viguetas por su dimensión y por la disponibilidad de moldes no resultaba conveniente.

Cada parte del rótulo de las probetas corresponde respectivamente a: La inicial de que memorista corresponde, luego la mezcla, luego el porcentaje de fibra. en el caso de las viguetas con 0% de fibra solo se puso la mezcla y el porcentaje.

Luego los datos son los siguientes:

Tabla 3.17: Datos de las probetas cilíndricas.

Rotulación de la probeta:	Fecha de fabricación:	Fecha de Ensayo:	Días de fraguado	Tipo de Ensayo:
F-M1-0 %	23-mar	16-may	54	Tracción
F-M1-0 %	22-mar	12-may	51	Tracción
F-M1-0 %	22-mar	12-may	51	Tracción
F-M1-0 %	22-mar	16-jun	86	Compresión
F-M1-0 %	22-mar	16-jun	86	Compresión
F-M1-0 %	07-abr	26-ago	141	Compresión
F-M2-0 %	28-mar	12-may	45	Tracción
F-M2-0 %	28-mar	12-may	45	Tracción
F-M2-0 %	28-mar	18-may	51	Tracción
F-M2-0 %	28-mar	14-jul	108	Compresión
F-M2-0 %	28-mar	14-jul	108	Compresión
F-M2-0 %	06-abr	-	-	Reserva
F-M2-0.5 %	07-abr	31-may	54	Tracción
F-M2-0.5 %	07-abr	31-may	54	Tracción
F-M2-0.5 %	07-abr	23-jun	77	Compresión
F-M2-0.5 %	07-abr	23-jun	77	Compresión
F-M2-0.5 %	07-abr	-	-	Reserva
F-M2-0.5 %	07-abr	-	-	Reserva
F-M2-1 %	07-abr	31-may	54	Tracción
F-M2-1 %	07-abr	03-jun	57	Tracción
F-M2-1 %	07-abr	26-ago	141	Compresión
F-M2-1 %	07-abr	26-ago	141	Compresión
F-M2-1 %	07-abr	-	-	Reserva
F-M2-1 %	07-abr	-	-	Reserva
F-M1-0.5 %	12-abr	03-jun	52	Tracción
F-M1-0.5 %	12-abr	03-jun	52	Tracción
F-M1-0.5 %	12-abr	26-ago	136	Compresión
F-M1-0.5 %	12-abr	26-ago	136	Compresión
F-M1-0.5 %	12-abr	-	-	Reserva
F-M1-0.5 %	12-abr	-	-	Reserva
F-M1-1 %	14-abr	03-jun	50	Tracción
F-M1-1 %	14-abr	03-jun	50	Tracción
F-M1-1 %	14-abr	26-ago	134	Compresión
F-M1-1 %	14-abr	26-ago	134	Compresión
F-M1-1 %	14-abr	-	-	Reserva
F-M1-1 %	14-abr	-	-	Reserva

Tabla 3.18: Datos de las viguetas ensayadas en 3 puntos.

Rotulación de la probeta:	Fecha de fabricación:	Fecha de Ensayo:	Días de fraguado
M1-0 %	05-may	22-ago	109
M1-0 %	06-may	22-ago	108
M2-0 %	09-may	19-ago	102
M2-0 %	09-may	22-ago	105
F-M1-0.5 %	17-may	25-ago	100
F-M1-0.5 %	17-may	25-ago	100
F-M2-0.5 %	17-may	22-ago	97
F-M2-0.5 %	17-may	22-ago	97
F-M1-1 %	12-may	25-ago	105
F-M1-1 %	12-may	25-ago	105
F-M2-1 %	17-may	23-ago	98
F-M2-1 %	17-may	23-ago	98

Capítulo 4

4. Resultado y análisis

A continuación se presentarán los resultados de los ensayos a tracción, compresión y flexión en ensayo de 3 puntos, que fueron realizados como se explicó en la sección de Metodología experimental, además se expondrán algunas relaciones entre ambas mezclas. Cabe mencionar que para llegar a los resultados se debieron analizar y procesar los datos obtenidos desde los dos instrumentos que se usaron, que son los transductores LVDT y la máquina universal. Luego se hará una comparación entre el comportamiento de las propiedades mecánicas del HRFA en compresión, tracción y flexión.

Cabe mencionar antes lo siguiente:

- Para efecto de los resultados Tenacidad y energía post fisura o fisuración significan lo mismo.

4.1. Ensayos a tracción

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos a tracción realizados en probetas cilíndricas, cabe mencionar que el tiempo de fraguado para todas las probetas fue entre 45 y 57 días, y fueron construidas bajo condiciones lo más parecida posibles entre ellas, por lo que los resultados no debieran presentar un sesgo excesivo a no ser por los instrumentos de medición que no se pueden controlar. Los ensayos fueron realizados en la máquina universal a una velocidad de 0.5[mm/min], y el ensayo está programado para detenerse cuando haya un 80 % de degradación de la carga máxima.

Tabla 4.1: Resistencia a tracción, deformación unitaria de fisura y última de los ensayos de tracción.

Mezcla	% de fibra	f_{tr} [Mpa]	f_{tr} [Mpa] Promedio	ϵ_{cr} [-]	ϵ_{cr} [-] Promedio	ϵ_{ult} [-]	ϵ_{ult} [-] Promedio
M1	0	1.52	2.0	0.00013	0.00014	0.00014	0.00016
	0	2.39		0.00015		0.00019	
	0.5	2.17	1.97	0.00010	0.00008	0.00013	0.00050
	0.5	1.77		0.00005		0.00088	
	1	1.79	1.84	0.00008	0.00009	0.02254	0.02279
	1	1.90		0.00009		0.02305	
M2	0	1.75	1.73	0.00008	0.00009	0.00009	0.00010
	0	1.72		0.00009		0.00011	
	0.5	1.65	1.54	0.00010	0.00013	0.00096	0.00087
	0.5	1.43		0.00017		0.00079	
	1	1.36	1.40	0.00005	0.00007	0.04327	0.04522
	1	1.45		0.00009		0.04717	

Luego estos parámetros se calculan de forma directa desde los ensayos, donde:

- f_{tr} es la resistencia a tracción.
- ϵ_{cr} es la deformación unitaria de fisuración.
- ϵ_{ult} es la deformación unitaria última o de rotura.

Tabla 4.2: Tenacidad o Energía post fisuración a tracción y parámetro de ductilidad a tracción.

Mezcla	% de fibra	Tenacidad [J]	Tenacidad [J] Promedio	Ductilidad	Ductilidad Promedio
M1	0	0.04	0.1	1.1	1.2
	0	0.16		1.3	
	0.5	0.08	0.41	1.3	8.9
	0.5	0.73		16.5	
	1	29.92	29.36	267.5	262.6
	1	28.80		257.8	
M2	0	0.03	0.04	1.1	1.1
	0	0.05		1.2	
	0.5	0.60	0.49	10.0	7.4
	0.5	0.38		4.7	
	1	53.89	55.57	887.8	698.6
	1	57.25		509.4	

Luego ese parámetro de ductilidad que se usó solamente para dimensionar de alguna forma la influencia de las fibras corresponde a $(\epsilon_{ult}/\epsilon_{cr})$, y la tenacidad es el área bajo la curva de

carga-deformación del tramo plástico del ensayo hasta una degradación de la carga de un 80 %.

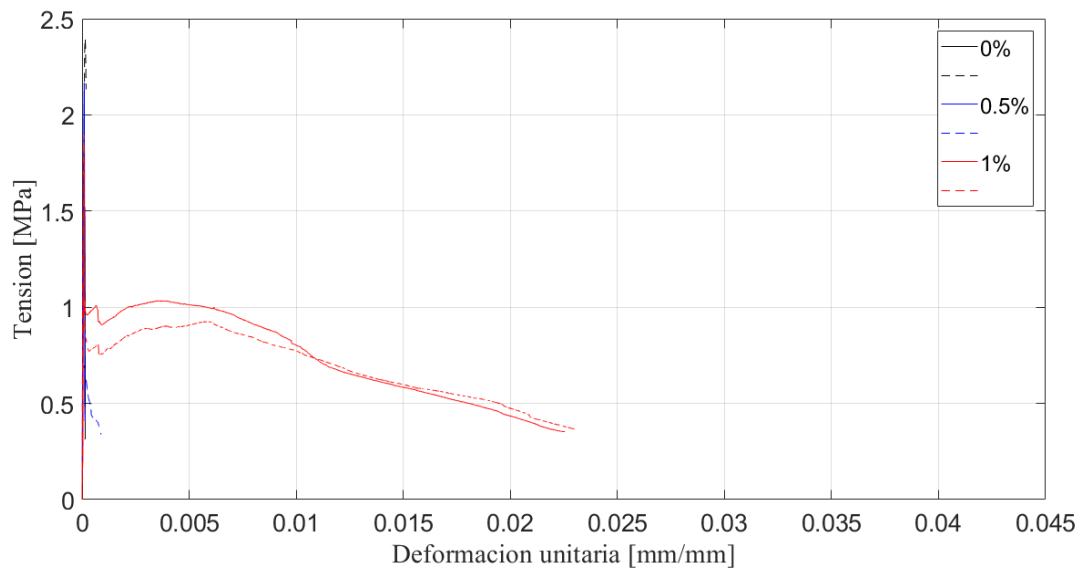


Figura 4.1: Ensayo de tracción directa para la mezcla 1 (Árido grueso).

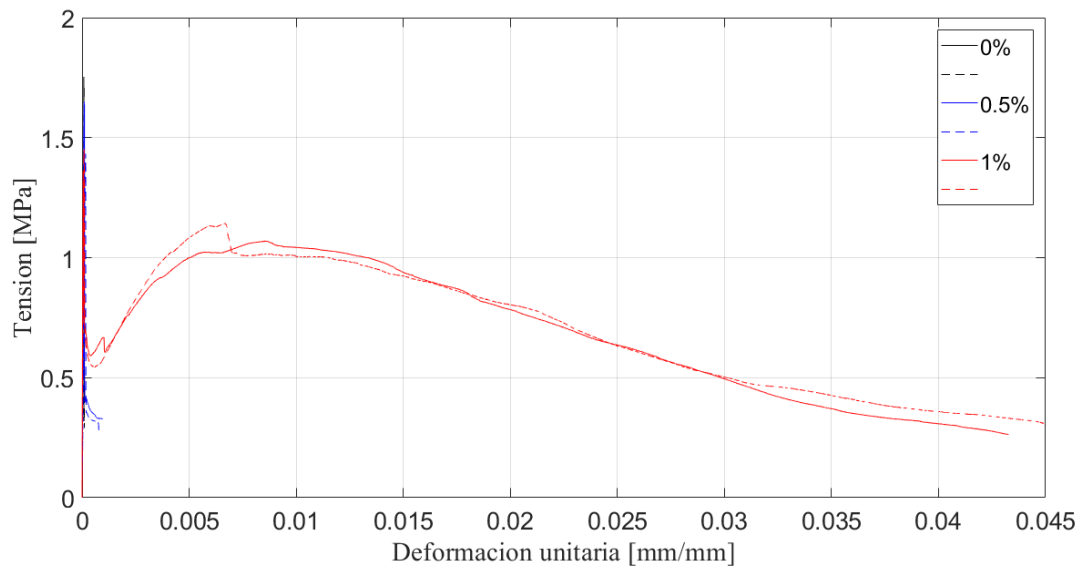


Figura 4.2: Ensayo de tracción directa para la mezcla 2 (Árido fino).

Luego tanto con la mezcla 1 como la mezcla 2 se observa la casi nula influencia que tiene una cuantía del 0.5% de fibras de acero comparada con una cuantía del 1%, otro detalle interesante para notar, es que ambas mezclas tienen deformaciones unitarias de fisura alrededor de 1×10^{-4} [mm/mm], lo que da a entender que las fibras no influyen mayormente antes de la fisura. Existe una degradación de la resistencia al incorporar fibra en el caso de la mezcla 2, algo que no sucede en la mezcla 1.

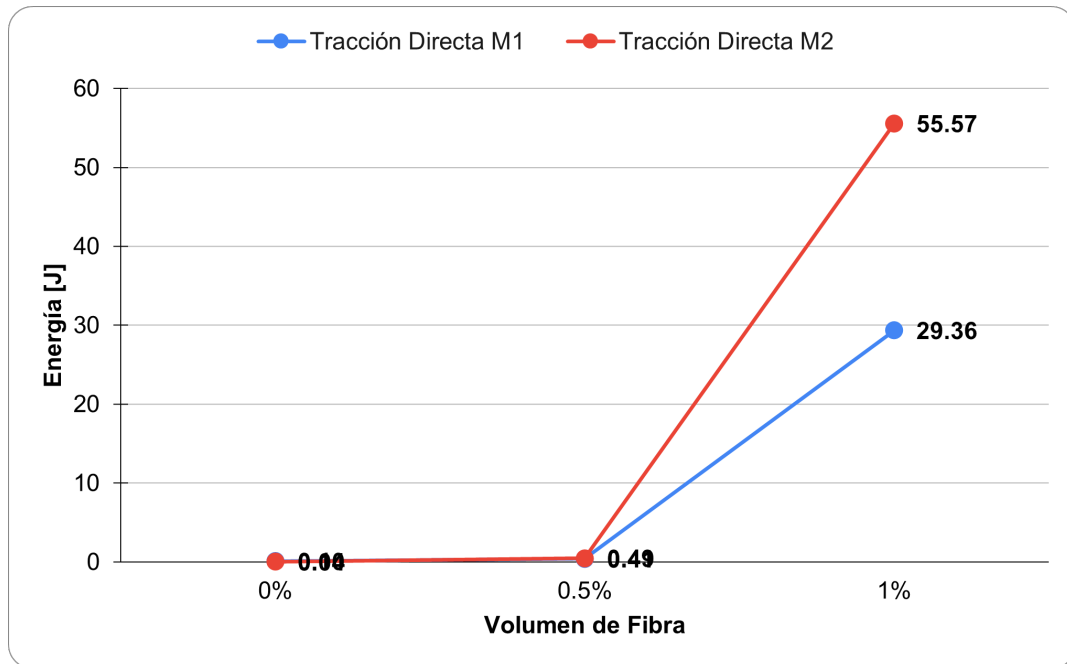


Figura 4.3: Energía post fisura a una degradación del 80 % de la carga en tracción directa para ambas mezclas.

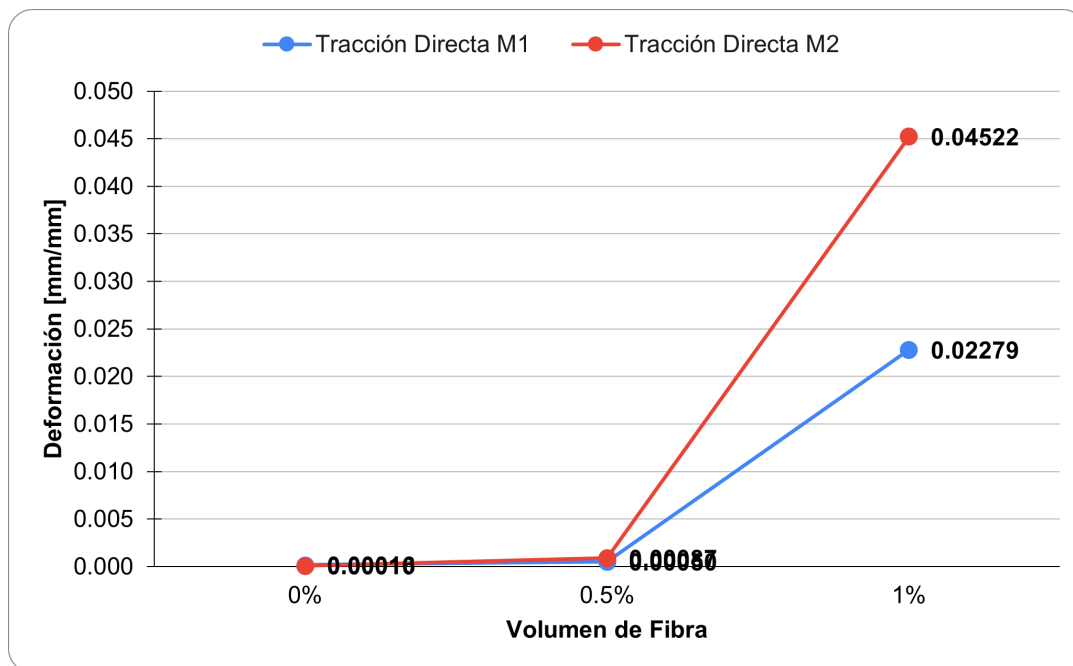


Figura 4.4: Deformación última para una degradación de la carga del 80 % en tracción directa.

A pesar de que las tensiones en general con la mezcla 1 son mayores a la mezcla 2, lo que se puede observar en las figuras (4.1 y 4.2), la mezcla 2 alcanza a absorber más energía que la mezcla 1 para cuantías del 1 % de fibra, esto es porque existe una correlación entre la deformación máxima y la energía, y es que mientras a mayores deformaciones la probeta pueda seguir tomando carga mayor es la energía que absorbe, y se observa que la

mezcla 2 tiene unas deformaciones máximas un 98 % mayores a las de la mezcla 1, lo que después se traduce en que la mezcla 2 absorbe un 89 % más de energía post fisura para una degradación de la carga del 80 %. Luego esta diferencia de un 9 % aproximadamente entre la absorción de energía post fisura y la deformación unitaria puede deberse a la influencia de la resistencia en ambas mezclas, ya que se puede ver como en el caso de la mezcla 1 se da una degradación de la carga un poco más suave que en la mezcla 2 que tiene endurecimiento después de la caída de la carga lo que explicaría ese 9 % de diferencia entre la deformación y la energía post fisura por su comportamiento de las fibras. Luego tanto las figuras (4.3 y 4.4), presentan comportamientos similares y demuestran que solo se llega a aumentar la capacidad de deformación del hormigón una vez que se llega a una cuantía de fibras de acero del 1 %, y dejando en claro que al menos en tracción directa, una cuantía del 0.5 % tiene una influencia casi nula o irrelevante en la ductilidad del HRFA.

4.2. Ensayos a compresión

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos a compresión realizados en probetas cilíndricas, cabe mencionar que estas probetas fueron construidas bajo condiciones lo más parecidas posibles entre ellas, por lo que los resultados no debieran presentar un sesgo excesivo a no ser por los instrumentos de medición que no se pueden controlar. Los ensayos fueron realizados en la máquina universal a 0.3[mm/min], y el ensayo está programado para detenerse cuando haya un 80 % de degradación de la carga máxima.

Tabla 4.3: Resistencia a compresión, deformación unitaria de fisura y última de los ensayos de compresión.

Mezcla	% de fibra	f_c [Mpa]	f_c [Mpa] Promedio	ϵ_{cr} [-]	ϵ_{cr} [-] Promedio	ϵ_{ult} [-]	ϵ_{ult} [-] Promedio
M1	0	32.2	33.9	0.0031	0.0033	0.0054	0.0052
	0	35.7		0.0035		0.0050	
	0.5	31.2	31.7	0.0029	0.0049	0.0056	0.0053
	0.5	32.2		0.0069		0.0050	
	1	30.4	29.6	0.0057	0.0040	0.0098	0.0099
	1	28.7		0.0024		0.0100	
M2	0	27.9	28.5	0.0028	0.0027	0.0036	0.0034
	0	29.0		0.0027		0.0031	
	0.5	28.6	28.2	0.0027	0.0024	0.0074	0.0086
	0.5	27.9		0.0021		0.0097	
	1	29.2	29.1	0.0020	0.0022	0.0136	0.0121
	1	29.0		0.0024		0.0105	

Luego estos parámetros se calculan de forma directa desde los ensayos, donde:

- f_c es la resistencia a compresión.
- ϵ_{cr} es la deformación unitaria de fisuración.
- ϵ_{ult} es la deformación unitaria última o de rotura hasta un 65 % de degradación de la carga.

Tabla 4.4: Parámetro para observar la ductilidad en ensayos de compresión y la energía post fisura en los ensayos de compresión.

Mezcla	% de fibra	Ductilidad	Ductilidad Promedio	Tenacidad [J]	Tenacidad [J] Promedio
M1	0	1.7	1.6	93.4	84.3
	0	1.5		75.2	
	0.5	1.7	2.1	85.1	92.9
	0.5	2.5		100.7	
	1	4.0	4.0	237.4	231.7
	1	4.1		226.0	
M2	0	1.3	1.2	38.8	31.5
	0	1.2		24.3	
	0.5	2.3	2.6	159.4	177.5
	0.5	3.0		195.5	
	1	3.7	3.6	287.6	253.2
	1	3.6		218.8	

Luego ese parámetro de ductilidad es el mismo que se usó en la sección anterior y corresponde a $(\epsilon_{ult}/\epsilon_{cr})$, y la energía post fisura es la integral de la carga por el desplazamiento hasta una degradación del 65% de la carga.

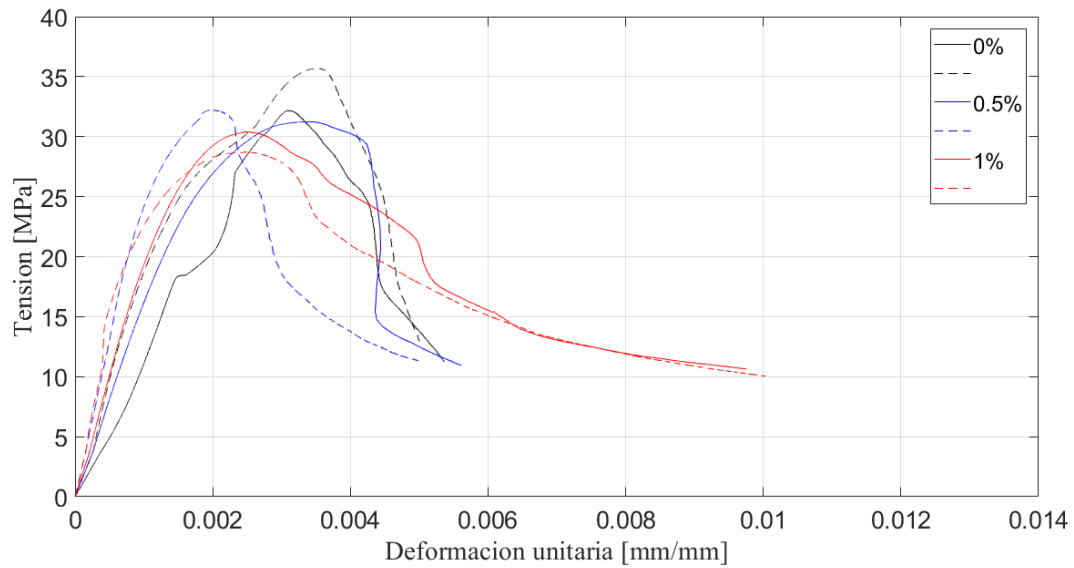


Figura 4.5: Ensayo de compresión para la mezcla 1 (Árido grueso).

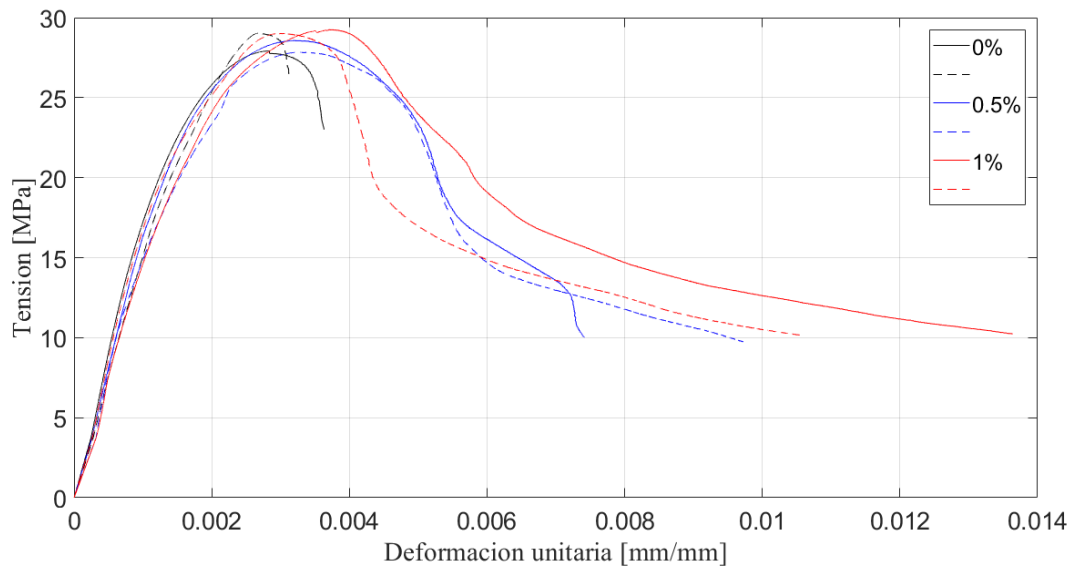


Figura 4.6: Ensayo de compresión para la mezcla 2 (Árido fino).

Nuevamente se puede observar que antes de la fisura en ambas mezclas la deformación unitaria de fisura está alrededor de 0.003 [mm/mm], por lo que se presume que las fibras no influyen en el tramo elástico, también el efecto de la cuantía de 0.5% no es comparable con la de 1% siendo la última más influyente en la ductilidad, la resistencia en el caso de la mezcla 1 se ve influida por la inclusión de fibras.

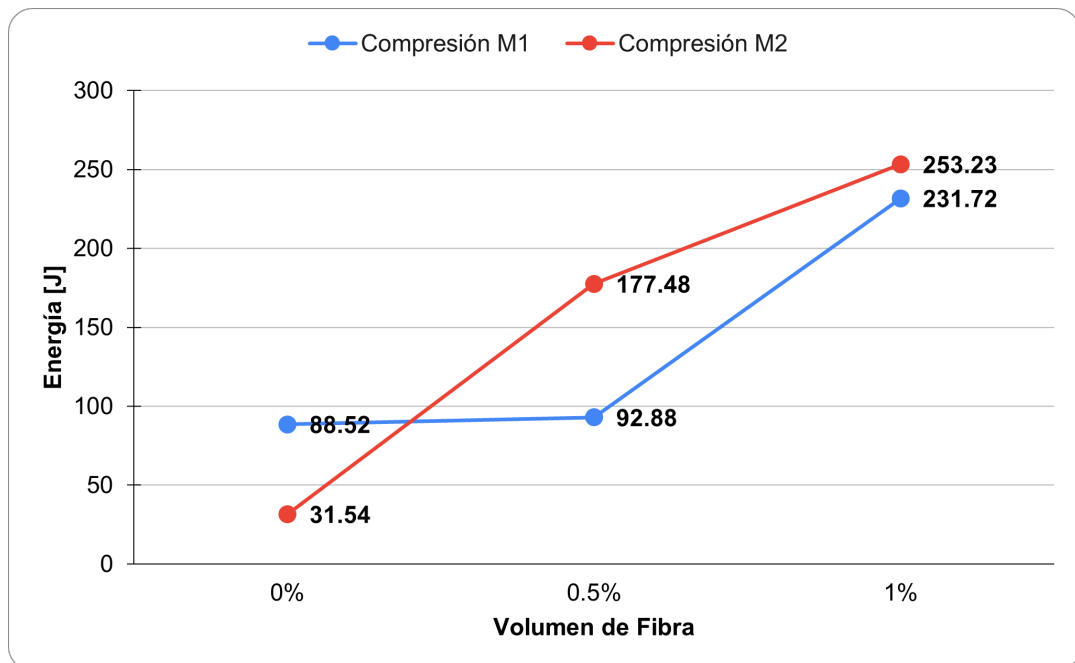


Figura 4.7: Energía post fisura a una degradación del 65% de la carga en compresión para ambas mezclas.

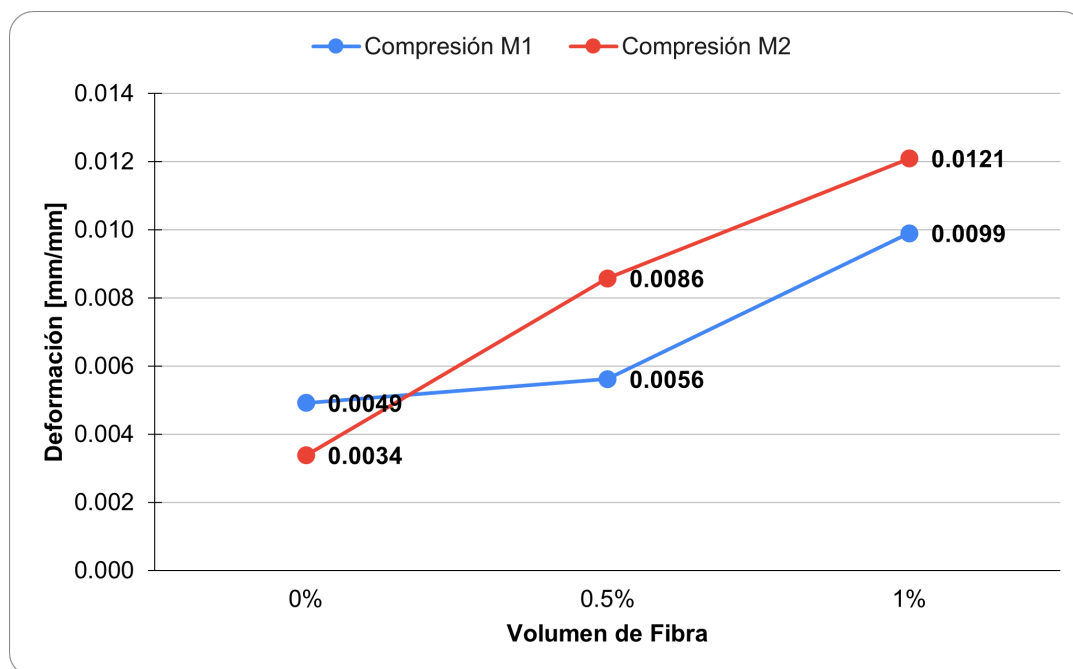


Figura 4.8: Deformación última para una degradación de la carga del 65 % en compresión.

Para los ensayos a compresión también se observa la correlación entre la deformación última (cuando existe una degradación de la carga de un 65 %) y la energía post fisura absorbida por el espécimen, nuevamente se nota una diferencia grande entre la inclusión de una cuantía de 0.5 % de fibras en la matriz de hormigón y una de un 1 % de fibra, siendo en el caso de la mezcla 2 un 42 % mayor la energía post fisura para una cuantía del 1 % comparada con una del 0.5 %. Sigue siendo influyente la propia inclusión de fibras, que en el caso de un 1 % de cuantía para la mezcla 2, es 8 veces la energía post fisura a cuando no se incluyen fibras. Luego en el caso de la mezcla 1, se nota aún más la diferencia entre una cuantía del 0.5 % y el 1 % de fibras, siendo la energía post fisura con un 1 % de fibras 2.7 veces la energía post fisura con un 0.5 % de fibra, cabe mencionar que en la mezcla 1 casi no hubo diferencia al incluir fibras en la matriz. Y también se debe mencionar que la resistencia con la mezcla 1 es mayor a la resistencia con la mezcla 2. Como se puede ver con respecto a la capacidad de deformación indiferente de la carga aplicada, solo en el caso de las cuantías de un 1 % de fibra se logró una influencia en la ductilidad del hormigón, siendo esta mayor en la mezcla 2 que en la mezcla 1, pero aún así estando las deformaciones unitarias en torno al 1 % que es más de 3 veces mayor a lo que alcanza el hormigón como material frágil, en el caso de la cuantía del 0.5 % de fibra, esta solo cobró relevancia para la mezcla 2 con árido fino, siendo casi irrelevante para la mezcla 1.

4.3. Ensayos a flexión (Ensayo de 3 puntos)

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos a flexión, o ensayo de 3 puntos o three-point bending test (3PBT), realizados en viguetas, cabe mencionar que estas viguetas tienen tiempos de fraguado entre 97 y 109 días y fueron construidas bajo condiciones lo más parecida posibles entre ellas, por lo que los resultados no debieran presentar un sesgo excesivo a no ser por los instrumentos de medición que no se pueden controlar. Los ensayos fueron realizados en la máquina universal a 0.3[mm/min], y el ensayo está programado para detenerse cuando haya un 80 % de degradación de la carga máxima.

Tabla 4.5: Resistencia a flexión, carga máxima y deformación de fisura en los ensayos de flexión.

Mezcla	% de fibra	δ_{cr} [mm]	δ_{cr} [mm] Promedio	f_{fl} [Mpa]	f_{fl} [Mpa] Promedio	Q_{max} [kgf]	Q_{max} [kgf] Promedio
M1	0	0.291	0.291	-	2.99	-	1719.0
	0	0.291		2.99			
	0.5	0.156	0.208	3.66	3.95	2103.1	2264.7
	0.5	0.260		4.23			
	1	0.245	0.238	4.38	3.88	2512.7	2228.2
	1	0.232		3.39			
M2	0	0.324	0.276	2.79	2.53	1600.5	1455.0
	0	0.227		2.28			
	0.5	0.220	0.286	3.18	3.39	1828.0	1944.6
	0.5	0.353		3.59			
	1	0.329	0.308	2.67	2.90	1533.0	1664.8
	1	0.286		3.13			

Luego estos parámetros se calculan de forma directa desde los ensayos, donde:

- Q_{max} es la carga máxima en el centro del vano.
- δ_{cr} es la deformación de fisuración.
- δ_{ult} es la deformación última o de rotura.
- f_{fl} es la resistencia a flexión y se calcula según la norma EN 14651 [8]

Tabla 4.6: Energía post fisura en ensayo de 3 puntos estandarizado hasta la deformación de la tensión residual f_4 [MPa].

Mezcla	% de fibra	Tenacidad [J]	Tenacidad [J] Promedio
M1	0	0.16	0.16
	0	0.16	
	0.5	31.28	31.76
	0.5	32.23	
	1	48.39	45.44
	1	42.49	
M2	0	0.04	0.56
	0	1.07	
	0.5	26.95	26.14
	0.5	25.33	
	1	36.38	45.13
	1	53.87	

Donde la tenacidad fue el parámetro que se utilizó para medir la ductilidad ya que representa la degradación de la resistencia según el desplazamiento, y en el caso de las viguetas, muchos ensayos alcanzaron deformaciones tan grandes que los ensayos tuvieron que detenerse antes de lograr un 80% de la degradación de la carga que es cuando la máquina universal estaba configurada para detenerse, entonces esto genera un sesgo a la hora de estandarizar un criterio para medir la ductilidad y por esto se utilizó la tenacidad hasta los 3.02 [mm] que es donde se ubica la cuarta tensión residual.

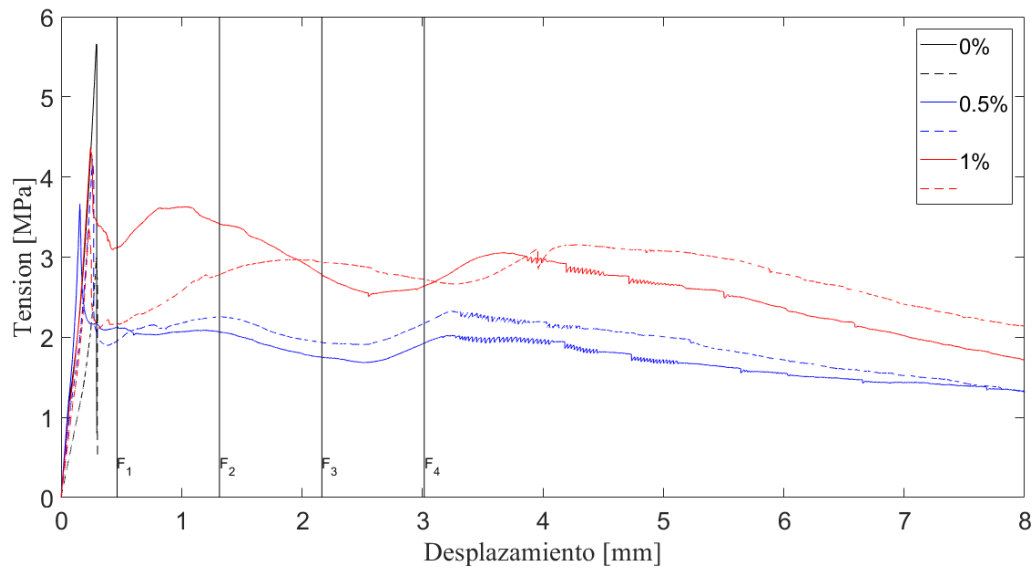


Figura 4.9: Ensayo de 3 puntos para la mezcla 1 (Árido grueso).

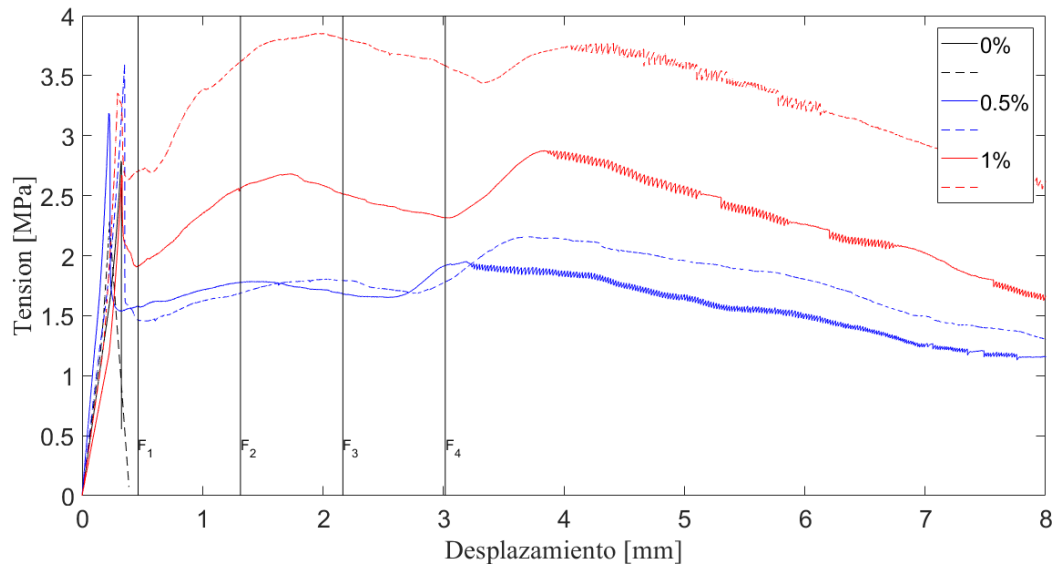


Figura 4.10: Ensayo de 3 puntos para la mezcla 2 (Árido fino).

Al igual que anteriormente, se puede ver que las fibras no afectan en el tramo elástico, ya que todas las viguetas, para ambas mezclas y todas las cuantías, encuentran su δ_{cr} alrededor de los $0.25[mm]$, también se puede ver que tanto las cuantías del 0.5% y 1% en ambas mezclas tienen una ductilidad aceptable, sin embargo, con la cuantía del 0.5% existe una degradación de la resistencia mucho mayor que con la del 1% . Nuevamente, en el caso de la mezcla 1 se ve afectada la resistencia por la inclusión de fibra, algo que no sucede en la mezcla 2. Con las tensiones 1 a la 4 se puede observar como en el caso de la mezcla 1, es bastante pareja la resistencia a lo largo de las deformaciones en el tramo plástico, algo que se repite para la mezcla 2, pero solo para una cuantía del 0.5% , en el caso de la cuantía del 1% con la mezcla 2, ocurre un caso muy particular, y es que existe un endurecimiento de la vigueta en el tramo plástico, lo que hace que llegue a tener más resistencia en el tramo plástico que en el elástico.

Luego según la norma EN 14651, que es la norma europea que rige los ensayos de 3 puntos para hormigón reforzado con fibras de acero se calcularon las $f_{1,2,3,4}$, que corresponden al valor de tensiones, para los valores de $CMOD_{1,2,3,4} = \{0.5, 1.5, 2.5, 3.5\}[mm]$, que equivalentemente corresponde a los valores de desplazamiento $\delta_{1,2,3,4} = \{0.47, 1.32, 2.17, 3.02\}[mm]$.

Tabla 4.7: Tensiones (1, 2, 3, 4) según la norma EN14651.

Mezcla	% de fibra	f_1 [Mpa]	f_1 [Mpa] Promedio	f_2 [Mpa]	f_2 [Mpa] Promedio	f_3 [Mpa]	f_3 [Mpa] Promedio	f_4 [Mpa]	f_4 [Mpa] Promedio
M1	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	0	-		-		-		-	
	0.5	2.13	2.04	2.06	2.16	1.75	1.84	1.93	2.05
	0.5	1.96		2.26		1.93		2.18	
	1	3.12	2.64	3.41	3.10	2.77	2.85	2.64	2.68
	1	2.17		2.78		2.94		2.72	
M2	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	0	-		-		-		-	
	0.5	1.58	1.52	1.78	1.74	1.68	1.74	1.92	1.85
	0.5	1.46		1.69		1.79		1.78	
	1	1.91	2.31	2.56	3.09	2.51	3.16	2.32	2.95
	1	2.71		3.62		3.81		3.58	

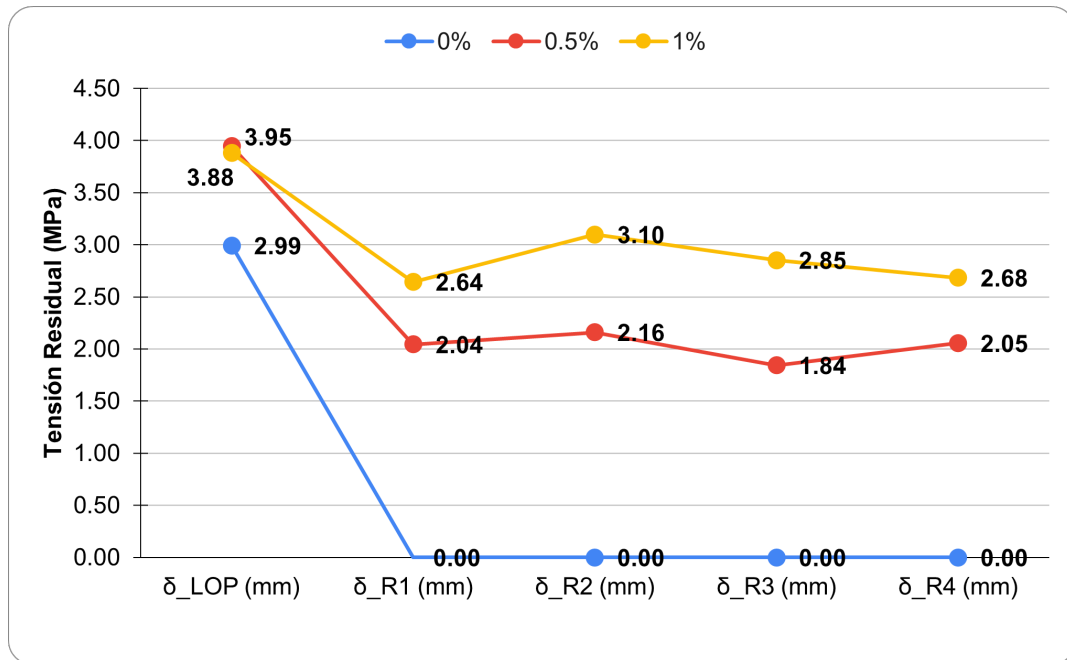


Figura 4.11: Tensiones residuales promedios para la mezcla 1

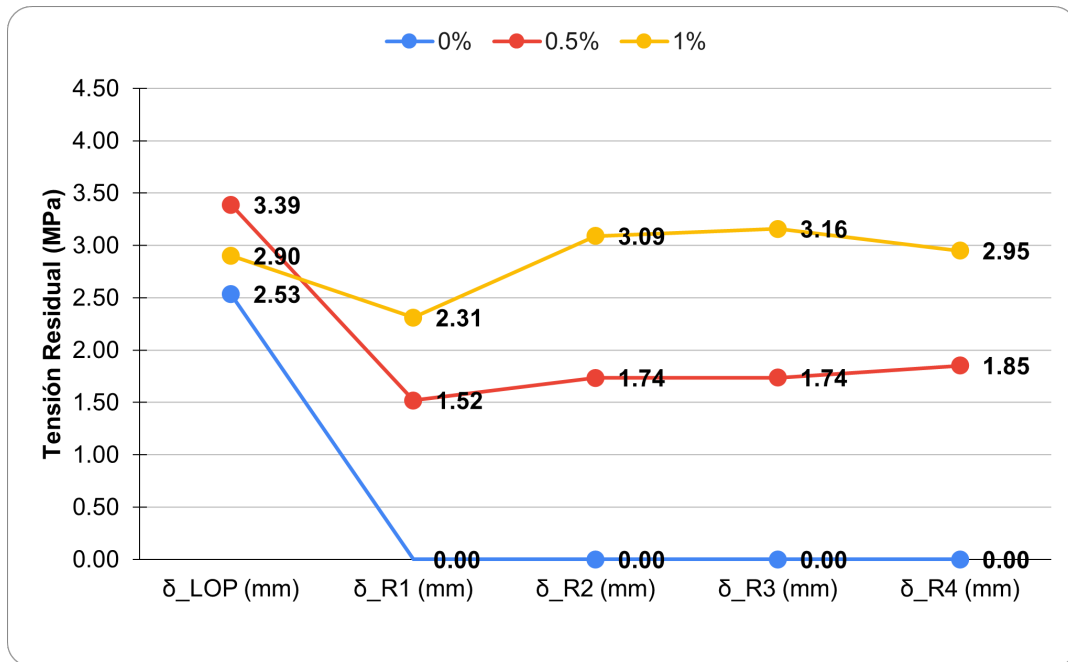


Figura 4.12: Tensiones residuales promedio para la mezcla 2

Se puede observar en las figuras (4.11 y 4.12), la influencia de la mezcla y las fibras en la resistencia, ya que la mezcla 1 ya sea con fibras o sin fibras presenta mayor resistencia elástica que la mezcla 2, sin embargo, en cada mezcla también se puede observar la influencia de las fibras, ya que la resistencia elástica aumenta con el [%] de fibras que se incluye, a pesar de que en la mezcla 2 ocurrió una eventualidad donde la resistencia elástica fue más baja con un 1% de fibras que con 0.5%.

Luego al respecto de las tensiones residuales, que es un concepto que aplica únicamente al hormigón reforzado con fibras de acero, para la primera tensión residual en el caso de la mezcla 1, se reduce en un 47% para el caso de una cuantía del 0.5% de fibra y un 33% para el caso de una cuantía del 1%. Luego para la mezcla 2 con una cuantía del 0.5% hay una degradación del 55% de la resistencia para la primera tensión residual, mientras que para la cuantía del 1% hay una degradación de un 26% para la primera tensión residual, sin embargo, ocurre un fenómeno particular y es que la tensión residual es mayor a la elástica desde la segunda tensión residual hasta la cuarta. Tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2 las tensiones residuales fueron constantes entre ellas, aunque en la mezcla 2 para la segunda tensión residual hubo un aumento de un 25% en la resistencia para la cuantía de un 1% de fibra, que luego a esto siguió constante.

Con respecto a la ductilidad que se puede lograr a flexión con la inclusión de fibras, se puede observar que tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2 (figuras (4.9 y 4.10)), las viguetas siguen resistiendo de manera constante a lo que se observaba en la cuarta tensión residual hasta que se termina el ensayo cerca de los 8[mm], lo que implica que a flexión aumenta la ductilidad notablemente con las fibras, se puede observar que para la mezcla 1 la tensión se mantiene constante, mientras que para la mezcla 2 esta decae linealmente desde cierto punto, pero manteniendo una carga aceptable hasta el final del ensayo. En el caso de la ductilidad a flexión, la única diferencia que se alcanza a notar entre la cuantía de un 0.5% de fibras y de un 1% de fibras es una diferencia de la carga que llegan a tomar las viguetas, y es que a lo largo de todo el ensayo para ambas mezclas la cuantía del 1% es más resistente

que la del 0.5 %.

4.4. Comparación entre ensayos

A continuación se presentarán algunas comparaciones entre ensayos en los resultados, cuando estos son comparables, el caso se da en las tensiones y en la tenacidad que está medianamente estandarizada para los 3 tipos de ensayo, en cambio para las deformaciones las unidades de análisis entre compresión y tracción directa coinciden para ser comparables, pero para flexión solo se obtuvo la deformación, aparte de que muchos ensayos de flexión fueron detenidos a una deformación arbitraria por lo que no tiene sentido ponerlo en comparación con los otros ensayos.

Tabla 4.8: Resumen de los promedios de las tensiones.

Mezcla	% Fibra	f_c [Mpa]	f_{tr} [Mpa]	f_{fl} [Mpa]
M1	0 %	33.93	1.96	2.99
	0.5 %	31.25	1.97	3.95
	1 %	29.56	1.84	3.88
M2	0 %	28.48	1.73	2.53
	0.5 %	28.21	1.54	3.59
	1 %	29.13	1.40	2.90

Donde:

- f_c es la resistencia a compresión.
- f_{tr} es la resistencia a tracción directa.
- f_{fl} es la resistencia a flexión.

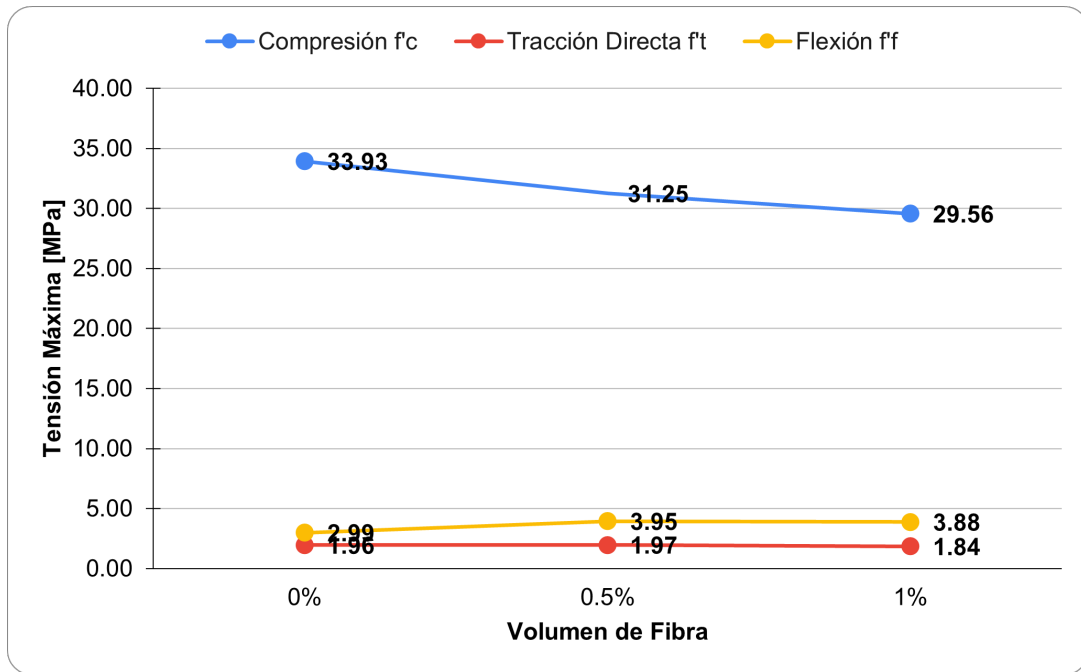


Figura 4.13: Tensiones máximas promedio para la mezcla 1 en cada ensayo.

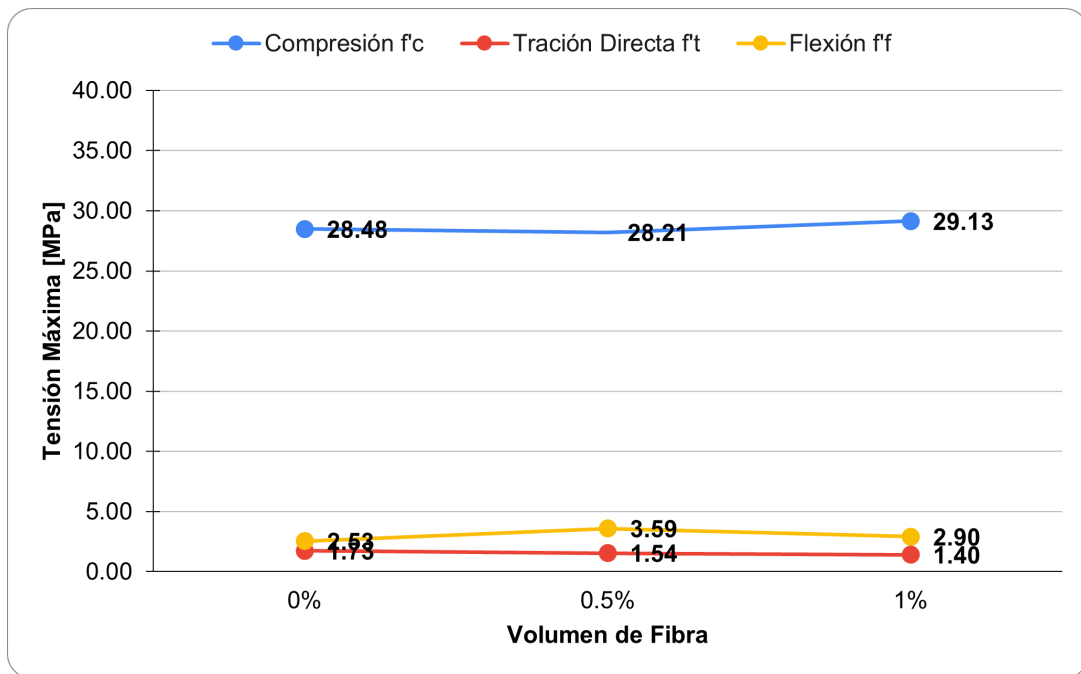


Figura 4.14: Tensiones máximas promedio para la mezcla 2 en cada ensayo.

Tabla 4.9: Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra.

Mezcla	% Fibra	Variación f_c [%]	Variación f_{tr} [%]	Variación f_{fl} [%]
M1	0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	0.5 %	-7.92 %	0.64 %	31.75 %
	1 %	-12.90 %	-5.84 %	29.62 %
M2	0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
	0.5 %	-0.94 %	-11.10 %	41.67 %
	1 %	2.29 %	-18.99 %	14.42 %

Luego graficado queda de la siguiente manera:

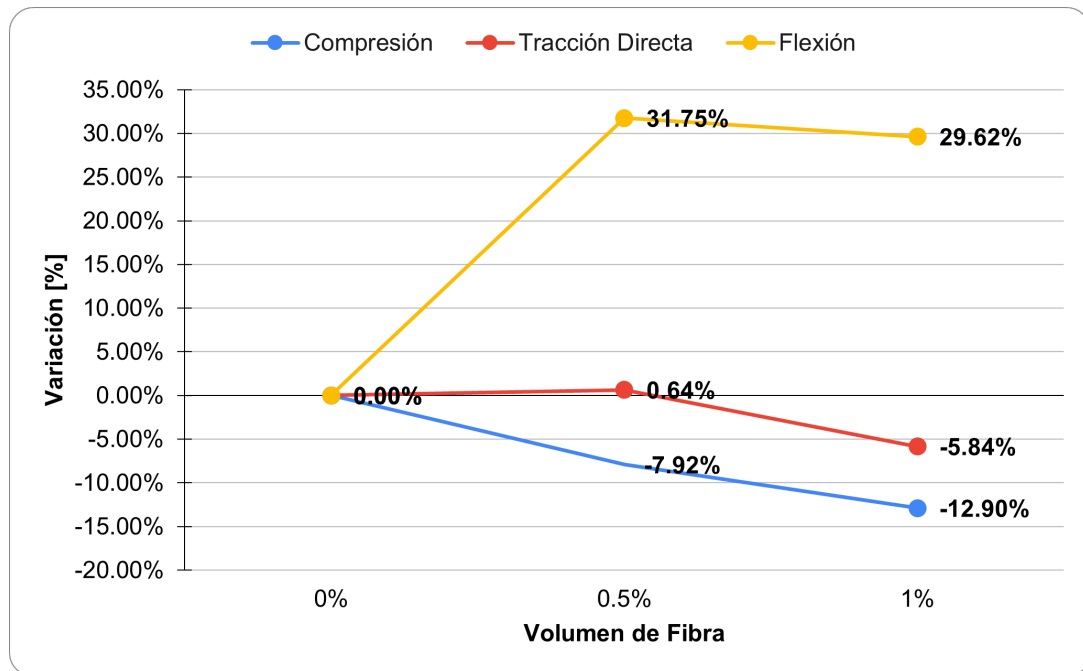


Figura 4.15: Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 1.

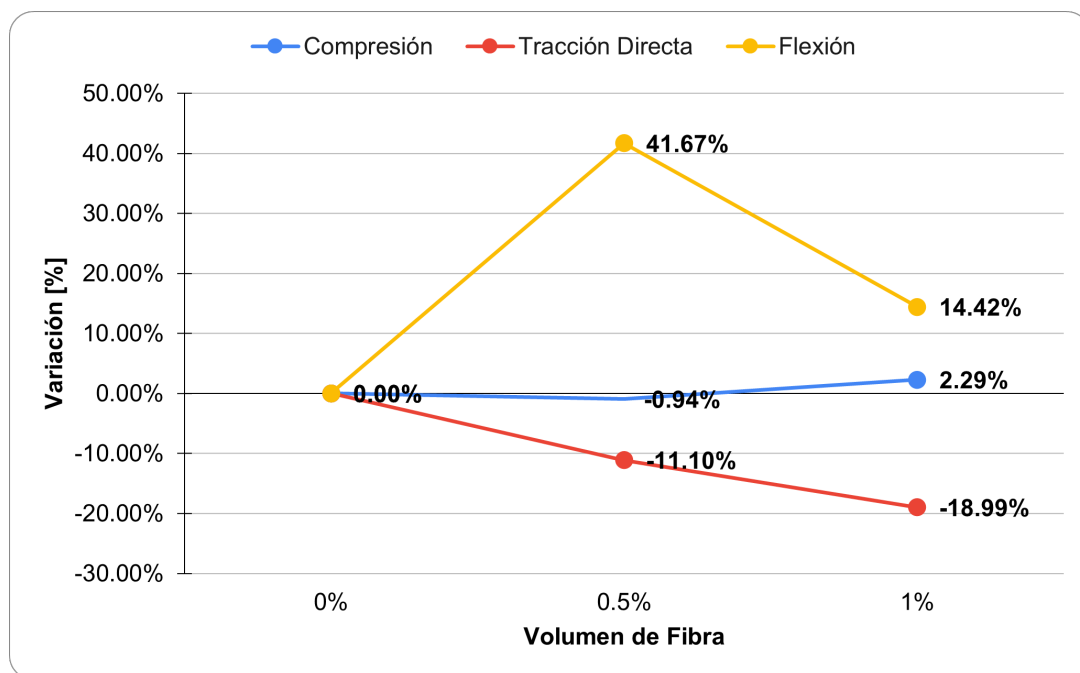


Figura 4.16: Variación porcentual de las tensiones obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 2.

Como se puede observar en la figura (4.13 y 4.14) mientras las resistencias a flexión y tracción son relativamente cercanas entre ellas la resistencia a compresión es mucho mayor, y esto se da porque la matriz de hormigón es conocida por su gran resistencia a compresión mientras que no es tan resistente a flexión y tracción. Por otro lado mientras se puede observar casi una tendencia negativa en la variación de la resistencia para los ensayos a tracción y compresión con la inclusión de fibras, para flexión esta variación es mayoritariamente positiva, esto se puede deber a la naturaleza de los ensayos ya que los primeros dos son directos y el tercero no, también puede que la dirección en la que trabaja la fibra en los primeros dos casos la fibra no contribuye con la resistencia y en el caso de flexión si, otra opción puede ser que en las probetas cilíndricas se dé una distribución distinta de las fibras por el molde en el que se contienen, mientras que se distribuyen más homogéneamente y mejor en una probeta de mayores dimensiones. Se puede observar que tanto para la mezcla 1 como para la mezcla 2 la tendencia es similar.

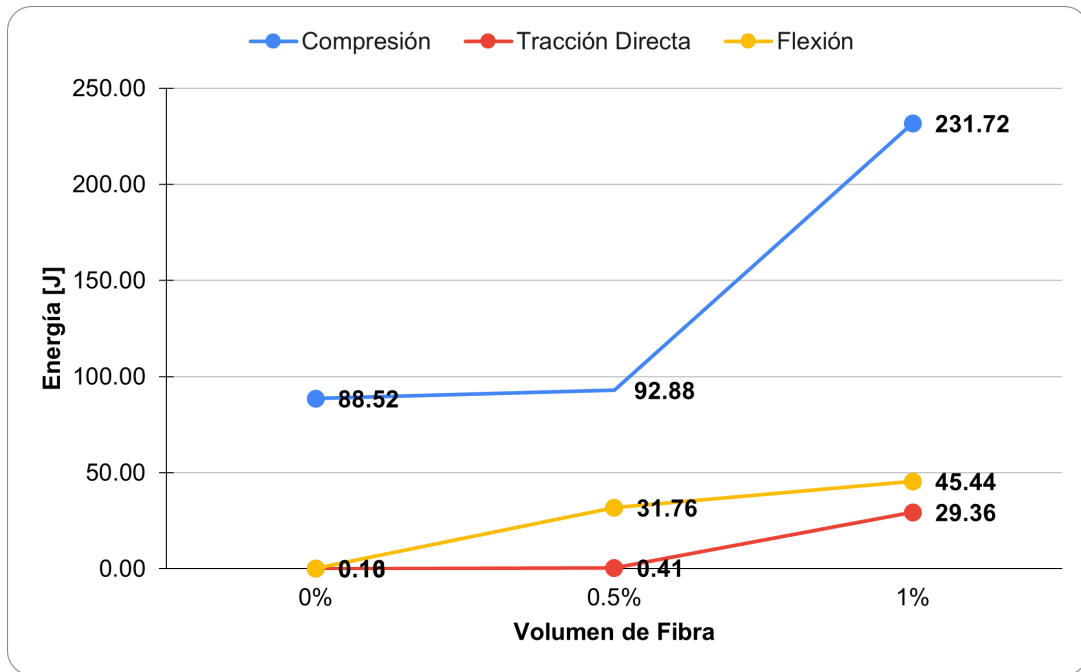


Figura 4.17: Energías post fisuración promedio para la mezcla 1 en cada ensayo.

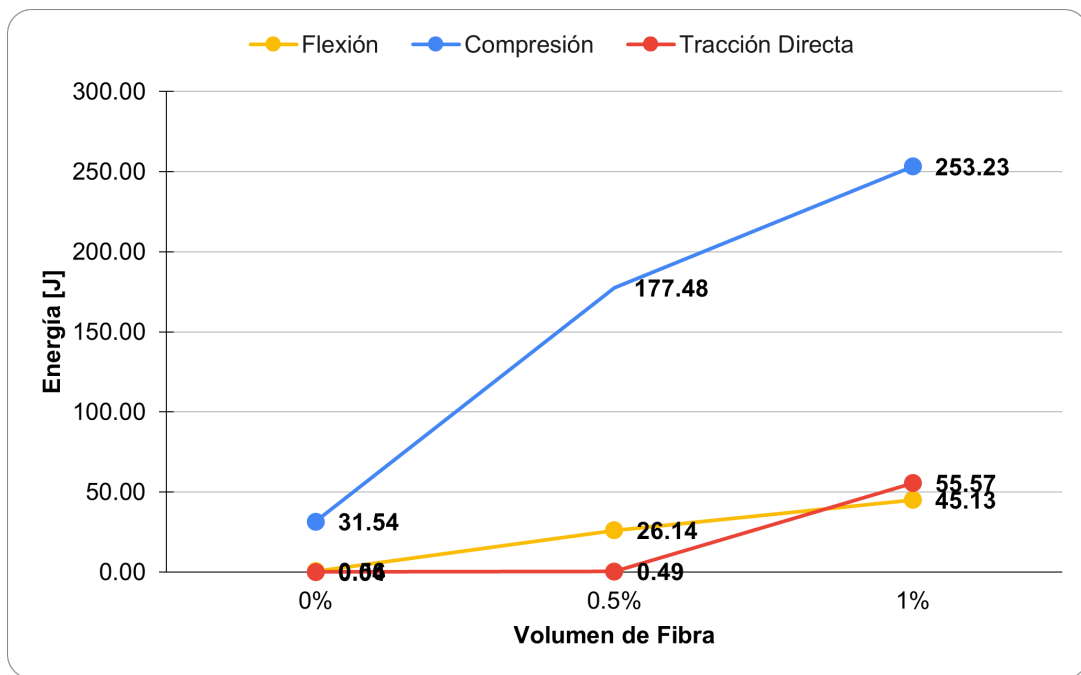


Figura 4.18: Energías post fisuración promedio para la mezcla 2 en cada ensayo.

Tabla 4.10: Variación de la energía post fisuración en los distintos ensayos usando como base los ensayos en probetas con 0 % de fibra, motivos por el cual los ensayos con 0 % de fibra tienen el valor 1.

Mezcla	% Fibra	Variación de la Tenacidad a compresión [J]	Variación de la Tenacidad a tracción [J]	Variación de la Tenacidad a Flexión [J]
M1	0 %	1.00	1.00	1.00
	0.5 %	1.05	4.20	193.36
	1 %	2.62	303.83	276.67
M2	0 %	1.00	1.00	1.00
	0.5 %	5.63	13.26	47.08
	1 %	8.03	1495.93	81.29

Luego graficado queda de la siguiente manera:

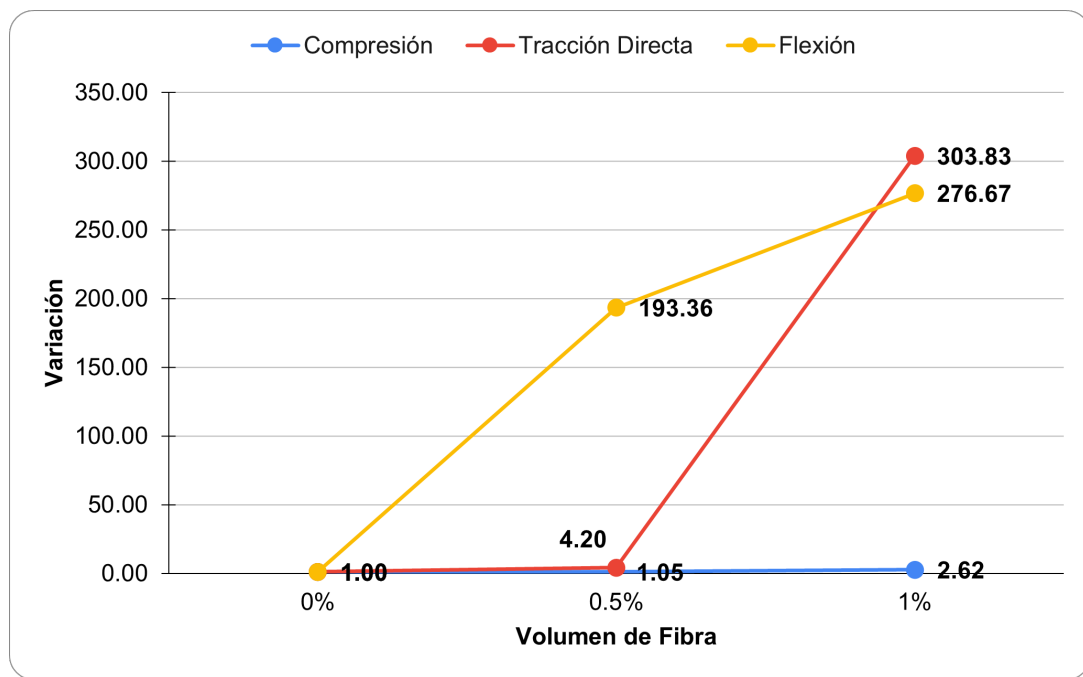


Figura 4.19: Variación de las energías post fisuración obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 1.

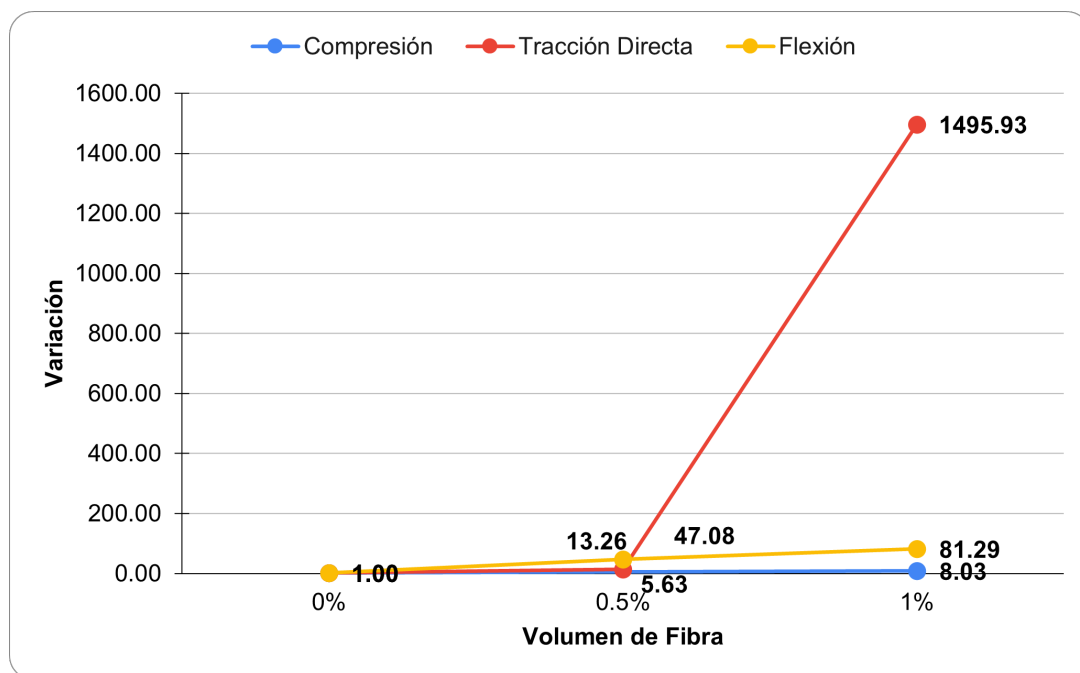


Figura 4.20: Variación de las energías post fisuración obtenidas con el refuerzo de fibras de acero con respecto de la tensión obtenida sin fibra para la mezcla 2.

Para efectos de análisis la energía post fisuración es una de las características más importantes, ya que por limitaciones dadas por los ensayos, es el parámetro llamado a medir la ductilidad del material ya que pondera la resistencia del hormigón y la capacidad de deformación del mismo. Como se puede observar en las figuras (4.17 y 4.18) nuevamente el ensayo de compresión por tener una resistencia mucho más alta presenta valores mucho más altos de energía post fisuración en relación al resto de los ensayos, también se puede observar como la energía post fisuración en tracción y flexión son relativamente similares comparadas con las de los ensayos a compresión, por otro lado tanto para la mezcla 1 como la mezcla 2 se puede observar un mucho mejor comportamiento con un 1 % de cuantía de fibra que con 0.5 % donde en algunos casos no se observa ningún efecto como en el caso de los ensayos a tracción y de flexión con un 0.5 % de fibra para la mezcla 1. Luego en la tabla 4.10 y las figuras (4.19 y 4.20) se puede ver "cuantas veces" es más dúctil el hormigón con fibras en relación al hormigón convencional, con valores siempre mayores a 1 lo que quiere decir que siempre que se introducen fibras de acero en el hormigón la ductilidad aumenta, en el caso de las mezclas con un 1 % de fibra este valor es mayor a 80 y llega hasta 1496, siendo este valor un poco sesgado por la clase de ensayo, pero que si se observa en la mezcla 1, tanto la flexión como la tracción este valor está alrededor de 290, por otro lado este valor en los ensayos a compresión es menor, pero sigue siendo mayor a 1, esto se da por el orden de los valores de energía post fisuración que se manejan en compresión.

Capítulo 5

5. Conclusiones

En este trabajo experimental se sometieron a pruebas de tracción, compresión y flexión distintas probetas de hormigón y hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) de 0.5 % y 1 % de cuantía volumétrica de fibras (ver Tabla 3.10), el objetivo de estas pruebas y este trabajo era lograr caracterizar la resistencia a tracción, compresión y flexión del HRFA, así como lograr observar la mejora en el comportamiento en relación al hormigón convencional.

El HRFA aparte de ser un material que ya tiene una gran cantidad de estudios como se pudo ver en la revisión bibliográfica, que además tiene ensayos ya normalizados para su caracterización, y estándares para su uso, sigue siendo un material muy poco usado en el país como alternativa al hormigón armado. Esto se puede deber a que aún existe desconocimiento en el país acerca de sus propiedades y cuan beneficioso puede ser para los proyectos de hormigón, por otro lado también puede ser por la variabilidad y el costo de garantizar confianza con este material lo que puede ralentizar su uso.

En los ensayos a tracción se puede observar en la tabla 4.1 que en la mezcla 1 se mantiene estable la resistencia a pesar de la adición de fibras, de hecho con la adición de 0.5 % de fibras se llega a aumentar en un 5 % la resistencia, mientras que en la mezcla 2 se degrada continuamente con la adición de fibras, que quizás tiene mucho que ver con la mezcla, ya que la mezcla 2 cuenta con árido fino ($D_{max} < 5[mm]$), mientras que la mezcla 1 árido grueso ($D_{max} < 19[mm]$), lo que puede estar relacionado con estudios que dicen relación entre el largo de fibra y el diámetro máximo del árido (ver figura 2.11) con la resistencia, y es que cuando la fibra es mucho más larga que el diámetro máximo del árido, no se optimiza el uso de las fibras. Por otro lado el cono también tiene que ver con la trabajabilidad, pero también con la resistencia y es que la relación entre el árido fino y grueso también afecta en el cono, que si bien hace más trabajable el hormigón una mayor adición de árido fino, también merma la resistencia (Ver figura 2.7). Luego con la ductilidad se puede observar que una cuantía del 0.5 % no afecta mayormente en la ductilidad, lo que se puede observar tanto en la mezcla 1 como en la mezcla 2 al ver la figura 4.1, 4.2 y 4.4 esto puede tener su explicación, en que ni siquiera se llega al mínimo de fibras exigido por la ACI318 para una cuantía del 0.5 % que parte desde los $60[kg/m^3]$, como las resistencias son parecidas, la ductilidad es la que más afecta a la hora de absorber energía post fisuración, lo que se ve en la tabla 4.2, cabe mencionar que en el tramo elástico en ninguno de los casos se hizo notar la presencia de fibras.

Por los mismos motivos que en el párrafo anterior se tiene una merma en la resistencia a

compresión por la adición de fibras, pero también un motivo importante es la entrada de aire en la mezcla cuando se incluyen fibras, en este caso se necesitaría un vibrado más eficiente, que por las condiciones en las que se construyeron las probetas es muy difícil de lograr, nuevamente la mezcla 1 es más resistente que la mezcla 2 aunque esta diferencia disminuye con la adición de fibras, también se observa que en la mezcla 2 se mantiene constante la tensión a pesar de la inclusión de fibras. En compresión se tiene que la mezcla dos es más dúctil y se puede observar en la figura 4.8, esto se debe al modo de falla de las fibras Dramix 3D y es que estas fallan por deslizamiento (ver figura 2.4), y como se menciona en la sección 2.3 el árido fino favorece a la adherencia de las fibras a la matriz de hormigón, lo que al fin y al cabo genera que se demore más en deslizarse en la mezcla 2 que en la mezcla 1. Un problema de la adición de fibras es la variación de la resistencia en cada ensayo y es que con la adición de fibras se ven grandes variaciones en la resistencia entre dos ensayos iguales, esto se debe a lo difícil que son de controlar las condiciones cuando se trabaja con fibras esto se puede observar en la figura 2.8. Finalmente queda observar que en el caso de la mezcla 2 la degradación de la resistencia a compresión del hormigón es menos abrupta que en la mezcla 1. Luego a compresión se puede concluir que la mezcla dos llega a tener un poco más de capacidad de deformación que la mezcla 1 al llegar a deformaciones unitarias últimas mayores, lo que contribuye en gran parte con el parámetro que se utilizó para medir la ductilidad, es decir, la energía post fisuración, por otro lado el hecho de que las deformaciones unitarias últimas lleguen cercanas al 1 % demuestra el gran aporte de las fibras en la ductilidad del hormigón, aunque sigue siendo un problema el decaimiento de la carga post fisura.

En los ensayos a flexión se puede observar la gran influencia que tiene el tamaño del árido en la resistencia elástica, tal como se puede observar en las figuras 4.11 y 4.12 y es que la mezcla 1 con fibras llega a ser hasta un 36 % mayor que en la mezcla dos para el caso del hormigón con cuantías del 1 % de fibras, y que coincide con la diferencia que existe en la figura 2.12, sin embargo la mezcla 2 exhibe un comportamiento muy bueno a la hora de absorber energía post fisuración, lo que se observa con el endurecimiento que existe a partir de las fibras con cuantía del 1 % se puede observar claramente en la figura 4.10, y esto también coincide con el comportamiento que tiene el HRFA en la figura 2.21. En este caso la mezcla 1 es ligeramente más dúctil para ambas cuantías de fibra usando el parámetro de energía post fisuración hasta la última tensión residual para medir ductilidad, lo que en el caso de flexión puede ser por el árido, ya que al haber mayor resistencia elástica en la mezcla 1 si es que la reducción de la resistencia es más abrupta para una misma cuantía de fibra, la mezcla 1 al final se verá más afectada que la mezcla 2, pero igualmente podrá mantener parámetros altos de absorción de energía, esto se puede observar a partir de las tensiones residuales de la tabla 4.7 y las figuras 4.17 y 4.18, aunque para la cuantía del 1 % son parecidas las tensiones residuales, en el caso del 0.5 % se nota mayormente la degradación de la resistencia. Esto también es un punto de fiabilidad para el modelo de Julian Carrillo con Juan D. Vargas (ecuación (2.3)), ya que en el único valor que diferenciaría ambas mezclas sería la resistencia a compresión, calculando, resulta que para la cuantía de un 0.5 % el modelo da un $f_{R,1} = 2.03[MPa]$ para la mezcla 1, muy cercano al valor experimental, mientras que da $1.91[MPa]$ para la mezcla 2, que está algo lejos del valor experimental, pero sigue siendo un resultado no muy lejos de lo normal. En el caso de los ensayos de 3 puntos, se nota muy bien que las fibras no comienzan a actuar hasta después de alcanzada la tensión de fisuración ya que todas están cerca de los $0.3[mm]$ independiente del contenido de fibras. Luego puede que los valores del ensayo de 3 puntos hechos en este informe, disten un poco del ensayo hecho bajo los estándares

Europeos, ya que hubieron pequeñas variaciones dimensionales y de configuración a la hora de hacer las viguetas y los ensayos respectivamente, que según la EN 14651 son como en la figura 2.18, por otro lado hubieron diferencias a la hora de medir también, ya que hay ciertos estándares de velocidad que sigue la EN 14651 que no se tomaron en consideración a la hora de hacer estos ensayos, incluso con estos detalles, las tensiones residuales cumplen con los estándares europeos exigidos por la norma EN 14889-1. Luego terminando de profundizar en la ductilidad, nuevamente la cuantía de un 1 % de fibras está un paso adelante de al cuantía del 0.5 % en el caso de flexión para ambas mezclas, pero aún así sigue manteniendo ciertos estándares de capacidad de deformación esta cuantía a diferencia del resto de los ensayos, es notorio el endurecimiento que existió con la mezcla 2 y es muy posible que se deba a la buena adherencia que existe entre el árido fino y las fibras, luego viendo los gráficos de tensión-deformación se puede ver en todos los casos una tensión estable a pesar de seguir deformándose la vigueta, lo que muestra la efectividad de las fibras a la hora de aguantar deformaciones a flexión, y se optimiza su uso cuando se está bajo este tipo de solicitaciones, a diferencia de compresión y tracción, donde el aumento de ductilidad es notorio, pero no llega a tener la capacidad de deformación que existe en flexión.

Con respecto a los distintos ensayos que se realizaron se concluyó que para ensayos directos (compresión y tracción) las fibras afectaron negativamente, (ver la tabla (4.9) y las figuras (4.15 y 4.16)), mientras en los ensayos a compresión y tracción la variación de resistencia fue negativa, la resistencia a flexión varió positivamente, lo que muy posiblemente tiene con el carácter de los ensayos y es que al ser directos inciden directamente en el modo de falla de las fibras de acero, mientras que en los ensayos a flexión, aparte de ser indirecto, las fibras sufren esfuerzos en más ejes que el relacionado con el modo de falla que es por deslizamiento en el caso de las fibras de acero Dramix 3D, también se puede observar que es órdenes mayor la resistencia a compresión por sobre la resistencia a tracción directa y flexión, esto se debe a la gran resistencia a compresión del hormigón y la aún pobre resistencia a tracción de la matriz de hormigón que sigue controlando a pesar de la adición de fibras. En cuanto a la energía post fisuración se puede observar como las cuantías del 0.5 % son menos eficientes que las del 1 %, aparte de esto, en el caso de tracción directa, se nota muy poco la acción de las fibras cuando hay una cuantía del 0.5 % comparado con un 1 % haciendo notar que es un aporte ínfimo el de las fibras en una cuantía tan baja, se puede ver que el aumento relativo de tenacidad a compresión tiene un valor más bajo que en el caso de tracción directa y flexión, pero esto también se debe al gran valor numérico que por si solo tiene la tenacidad del hormigón a compresión que viene dada por su gran resistencia, para observar mejor esto se pueden analizar las figuras (4.17 y 4.18) y relacionarse con las figuras (4.19 y 4.20), se puede ver también como en las figuras (4.19 y 4.20) pareciera ser más dúctil la mezcla 1 que la mezcla 2 en flexión por una diferencia más grande de lo que realmente es numéricamente, ya que si se observan las figuras (4.17 y 4.18) se puede ver que se obtienen valores parecidos de energía post fisuración en ambos casos, lo que sucedió fue que las probetas sin fibra de la mezcla 2 fueron estrechamente menos frágiles que las de la mezcla 1, lo que provocó que al usar como base las probetas sin fibra, la variación se hiciera mucho más grande en la mezcla 1 que en la mezcla 2. También se puede observar en la tabla (4.10) que es más dúctil a compresión la mezcla 2 que la mezcla 1 lo que se condice con las deformaciones unitarias mayores que tiene la mezcla 2 por sobre la mezcla 1 (ver figuras (4.5 y 4.6)), esto se debe a algo que ya se mencionó antes, que es que el árido fino favorece la adherencia de la fibra al hormigón, análogamente sucede lo mismo con el comportamiento a tracción directa.

Terminando de comentar los resultados, se concluye que el árido fino para las fibras de acero Dramix 3D 65/35 contribuye más en la capacidad de deformación de los especímenes que el árido grueso, lo que solamente se puede ver afectado por una resistencia ligeramente menor, pero que al final no logra contrarrestar la ductilidad que se logra con el árido fino, esto se debe a que la adherencia que existe entre el árido fino y las fibras contribuyó más a la ductilidad que lo que logró la relación entre el diámetro máximo de árido y las fibras, esto puede estar muy ligado al modo de falla de las fibras que como se mencionó antes, fallan por adherencia y no por fluencia de estas.

Bibliografía

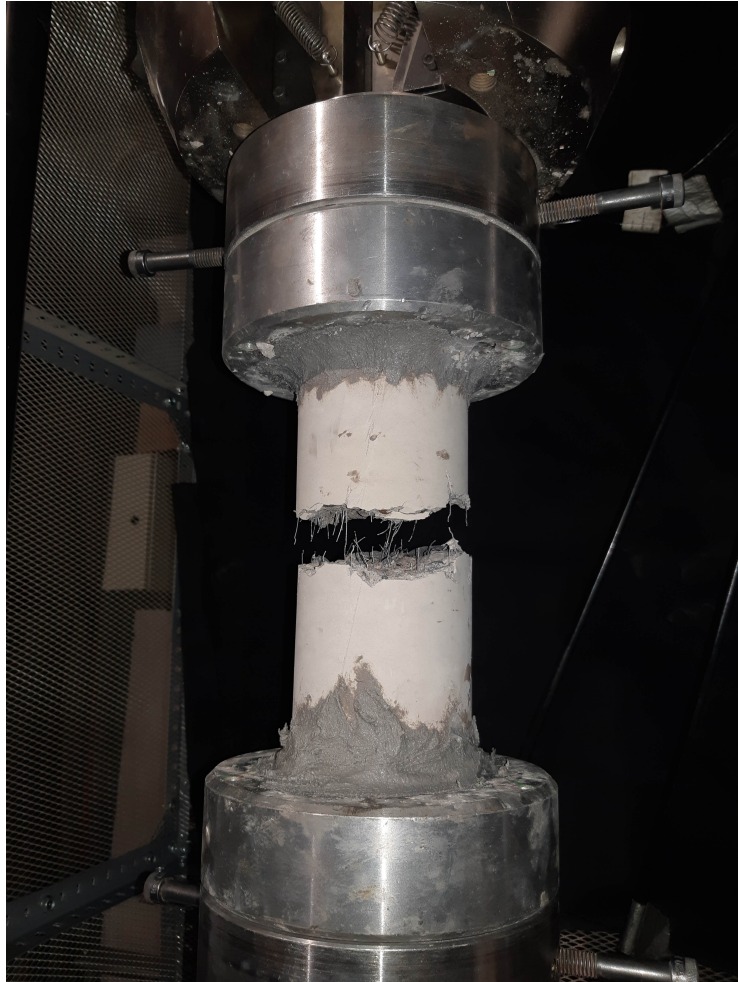
- [1] Harvinder Singh (2017), Steel Fiber Reinforced Concrete: Behavior, Modelling and Design
- [2] Bekaert (2012), Dramix
- [3] V Kesava Raju and K Srinivasa Rao (2019), The effect of aspect ratio steel fibers on the tensile behavior of standard concrete (M30)
- [4] Eduardo Almansa y Manuel Fernández (1997) Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero
- [5] Juhong Han, Mengmeng Zhao Jingyu Chen, Xiaofang Lan (2019), Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete
- [6] Julian Carrillo, Juan D. Vargas y Orlando Arroyo (2021), Correlation between Flexural-Tensile performance concrete reinforced with hooked-end steel fibers using US and European Standards
- [7] Julian Carrillo, Juan D. Vargas y Sergio M. Alcocer (2020), Model for estimating the flexural performance of concrete reinforced with hooked end steel fibers using three-point bending tests
- [8] European Standard (2005), EN 14651
- [9] Julian Carrillo, William Aperador y Giovanni González (2012), Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero
- [10] American Concrete Institute (2011), ACI 318-11

Anexo

Imágenes de las probetas ensayadas

A continuación se presentarán ejemplos de como fallaron las probetas ensayadas.

Tracción



Probeta con falla correcta a tracción, con plano de falla aproximadamente horizontal y en el tercio central.



Sección transversal de una probeta ensayada a tracción



Sección transversal de una probeta ensayada a tracción.

Se puede observar en la imagen anterior como las fibras ya perdieron su gancho que es lo que finalmente provoca la falla de la probeta y coincide con el modo de falla de las fibras de acero Dramix 3D 65/35.

Compresión



Probeta con falla típica a compresión.



Probeta con falla típica a compresión.



Probeta con falla típica a compresión.

Flexión



Vigueta con falla correcta en el centro de la luz en ensayo de 3 puntos.



Vigueta con falla correcta en el centro de la luz en ensayo de 3 puntos donde se observan parcialmente las fibras.

Cabe destacar que en la figura anterior se alcanza a observar como las fibras están estiradas lo que indica que falló el gancho, lo que coincide con el modo de falla de las fibras de Acero Dramix 3D 65/35.



Sección transversal de una vigueta ensayada en 3 puntos.