



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas**

**Diana Lucía Palomino Barón**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C., Colombia

2023



# **Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas**

**Diana Lucía Palomino Barón**

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería - Estructuras**

Director:

Ph.D. Ing. Juan Manuel Lizarazo Marriaga

Co Directora:

Ph. D Ing. Patricia Luna Tamayo

Línea de Investigación:

Materiales para Estructuras

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2023



*Dedicado a mi familia, mi novio y mis amigos  
por su apoyo, amor, y compañía durante todo  
este proceso.*



## **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Diana Lucía Palomino Barón

Nombre

31/01/2023

Fecha

# Agradecimientos

Agradezco principalmente a mis directores de Trabajo Final Ing. Juan Manuel Lizarazo e Ing. Patricia Luna por su paciencia, acompañamiento y ayuda en la resolución de los inconvenientes que surgieron en el tiempo de desarrollo de este trabajo.

A los ingenieros Simón Peñaranda de Cemex, Diana Herrera de Toxement y Felipe Salazar por la donación del material necesario para la realización de este trabajo.

A don Guillermo, Felipe Salazar y el grupo de materiales para construcción liderado por el profesor ing. Juan Manuel gracias por su apoyo en todo el proceso de preparación de las probetas.

Al ing. Darío Moreno técnico del laboratorio de estructuras, por su gran ayuda, amabilidad y amistad brindada.

Al ing. César Bacca técnico del laboratorio Inter facultades de Ensayos Mecánicos, por su amabilidad y apoyo en el desarrollo del método de ensayo.

A mi amigo Ricardo Jaramillo por siempre estar pendiente y por último a mi líder de departamento Sasha Rodriguez por el tiempo brindado para la realización de este trabajo y sus palabras de ánimo.

Y en general a todas las personas que participaron directa o indirectamente en el desarrollo de este trabajo final.

# Resumen

## Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas

La siguiente investigación presenta los resultados del estudio experimental del comportamiento a flexión y la capacidad de absorción de energía de vigas de concreto reforzado con fibras de polipropileno para cuatro diferentes dosificaciones de fibra  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$ , dos mezclas control sin fibras y dos tamaños diferentes de agregado grueso (TMN, 12.7mm y 19mm) después de estar bajo dos patrones de carga de tipo cíclico con 40 y 80 repeticiones (C1 y C2) controlando en ambos casos la amplitud de la carga, la cual se consideró constante e igual al 65% del módulo de ruptura promedio. Para las dosificaciones establecidas y las propiedades mecánicas de las fibras usadas, las probetas presentaron un comportamiento de ablandamiento debido a la caída repentina de la carga después de la fisuración, por lo tanto, los esfuerzos residuales calculados después de la rotura y la tenacidad se vieron significativamente afectados por la aplicación de las cargas externas de naturaleza cíclica ya que las probetas perdieron aún más la capacidad de mantener la carga. Adicional a lo anterior se evaluó la pérdida de resistencia de las fibras después de 110 días de exposición en cuatro concentraciones de iones de alcalinos de sodio y potasio (NaOH y KOH) teniendo en cuenta la composición de la solución de poros que simulan el ambiente de un concreto tradicional con solo cemento denominado 0% y tres concretos con adición de humo de sílice entre 5% y 15%. Las fibras expuestas a una concentración de 0% fueron las que más reaccionaron con el medio alcalino, disminuyendo el esfuerzo último de tensión en 16.17% con respecto a las fibras en estado natural (igual a 510.26MPa). En las fibras con adición de humo de sílice para los grupos de 5% y 10% se disminuyó el esfuerzo último de tensión en 5.11% y 1.74% respectivamente, para el último grupo (15%) el esfuerzo no se vio afectado por la concentración alcalina, incluso se obtuvo un ligero mayor valor de resistencia última de 526.65MPa. **Palabras clave: FRC, fibras de polipropileno, tensión, tenacidad, flexión, cargas cíclicas, esfuerzo residual.**

## Abstract

### **Flexural Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Cyclic Loading**

The following experimental study researched the behavior of reinforced concrete beams with four different PP fibre dosages  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{ kg/m}^3$ ,  $6\text{ kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  subject to cyclic flexural loading. Using two control samples with no fibre dosage, and varying coarse aggregates (TMN, 12.7mm y 19mm), limiting load applications to 65% of average ultimate moment was applied in 40 and 80 cycle tests (C1 y C2). For fiber added beams, there was a stiffness loss after cracking “flexural softening”, hence, residual stress and toughness were significantly affected by the cyclic nature of loading for test samples lost their capacity to withstand loading.

PP fiber strength loss was evaluated after 110 days of NaOH and KOH exposure, using four different ion concentrations to simulate the composition of the cement pore solution expected environment of traditional “0%” cement, and three different concentrations of fly ash and silica fume concrete. Fibres from 0% cement had the highest reaction to the alkaline environment, reducing up to 16.77% of tensile strength from unexposed fibres. Fibres with different fly ash concentrations 5% and 10% reducing up to 5.11% to 1.74% respectively tensile strength. In the last one group (15%) the tensile strength was not affected by the alkaline environment their strength in up to 3.21% more than patron group.

**Keywords: FRC, polypropylene fibres, tensile, toughness, bending, cyclic loading, residual stress.**

# Contenido

	Pág.
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
1.2. Planteamiento del Problema y Justificación.....	3
1.3. Organización del Trabajo.....	4
<b>Capítulo 2. Marco Teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción, Ensayo y Caracterización de Fibras.....	8
2.1.1. Dimensiones de las Fibras.....	8
2.1.2. Procedimiento de Ensayo a Tensión.....	9
2.1.3. Comportamiento a Tensión de las Fibras.....	10
2.2. Alcalinidad de la Pasta y Degradación de las Fibras.....	11
2.3. Propiedades Mecánicas del PFRC – Investigaciones Experimentales.....	12
2.3.1. Proporción de Agregados.....	12
2.3.2. Mecanismo de Trabajo de las Fibras.....	13
2.3.3. Influencia de la Dosificación, Longitud y Sección Transversal de las Fibras en las Propiedades Mecánicas del PFRP.....	14
2.3.4. Comportamiento a Compresión.....	16
2.3.5. Módulo de Elasticidad del Concreto.....	16
2.3.6. Desempeño y Tenacidad del Concreto Reforzado con Fibras.....	17
2.4. Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Bajo Cargas Cíclicas.....	22
2.5. Diseño de Concreto Reforzado con Fibras Normatividad Vigente.....	23
2.5.1. Códigos y Normas Internacionales.....	23
2.5.2. Códigos y Normas Nacionales.....	24
<b>Capítulo 3. Propiedades de Las Fibras – Programa Experimental Parte I.....</b>	<b>27</b>
3.1. Caracterización Geométrica de las Fibras.....	28
3.1.1. Medición Manual.....	29
3.1.2. Imagen Digital.....	30
3.1.3. Método Indirecto.....	33
3.1.4. Análisis de resultados.....	34
3.2. Propiedades Mecánicas a Tensión.....	36
3.2.1. Configuración y Metodología del Ensayo.....	36
3.2.2. Fibras en Concentraciones Alcalinas.....	37
3.2.3. Análisis de Resultados.....	38

<b>Capítulo 4. Propiedades Mecánicas del Concreto Reforzado con Fibras de PP - Programa Experimental Parte II .....</b>	<b>43</b>
4.1. Fabricación de Probetas.....	43
4.1.1. Dosificación .....	43
4.1.2. Mezclado, Vaciado y Curado .....	46
4.2. Esfuerzo a la Compresión .....	47
4.2.1. Configuración del Ensayo .....	47
4.2.2. Análisis de Resultados.....	48
4.3. Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson .....	51
4.3.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación .....	51
4.3.2. Análisis de Resultados.....	51
4.4. Resistencia a la Flexión.....	55
4.4.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación .....	55
4.4.2. Análisis de Resultados.....	56
<b>Capítulo 5. Comportamiento a Flexión de Vigas de PFRC Bajo Cargas Cíclicas – Programa Experimental Parte III.....</b>	<b>67</b>
5.1. Comportamiento a Flexión Bajo Cargas Cíclicas.....	67
5.1.1. Cargas Cíclicas.....	67
5.1.2. Deterioro de Parámetros de Flexión .....	69
5.2. Ensayo de Ultrasonido .....	79
5.2.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación .....	79
5.2.2. Análisis de Resultados.....	81
<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>83</b>
6.1. Conclusiones.....	83
6.1.1. Ensayos a Tensión Fibras de PP.....	83
6.1.2. Ensayos a Compresión y Módulo de Elasticidad Cilindros .....	84
6.1.3. Flexión y Tenacidad del Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno.....	85
6.2. Recomendaciones.....	86
6.2.1. Cantidad de Ensayos.....	86
6.2.2. Calibración del Equipo .....	87
6.2.3. Ensayos Adicionales.....	87
6.2.4. Predicción del Comportamiento a Flexión por Técnicas no destructivas.....	88
Anexo A: Caracterización de los Materiales .....	89
Anexo B: Imágenes Estereomicroscopio .....	109
Anexo C: Diseño de Mezcla.....	115
Anexo D: Dimensionamiento de Probetas .....	123
Anexo E: Resultados Individuales Ensayo a Flexión ASTM C1609 .....	129
Anexo F: Ensayo de Ultrasonido .....	147

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1: Marco para prueba a tensión de fibras. ....	9
Figura 2-2: Efecto del tamaño del agregado en la distribución de las fibras. a)12.7mm, b)19mm y c) 25.4mm.....	13
Figura 2-3: Esquema de mecanismo de trabajo de la fibra.....	14
Figura 2-4: Sección transversal de fibras de polipropileno: a) circular, b) triangular y c) trilobal. ....	15
Figura 2-5: Índice de eficiencia intrínseca FIER para secciones comunes.....	16
Figura 2-6: Representación esquemática del área bajo la curva, comparación entre la tenacidad de dos diferentes tipos de materiales. ....	18
Figura 2-7: Rango de carga-deflexión para matriz no reforzada y fibro-reforzada. ....	18
Figura 2-8: Curvas de carga-deflexión para dos tipos de fibras de polipropileno. a) Polipropileno extruido y b) Polipropileno fibrilado. ....	19
Figura 2-9: Curvas típicas de carga-deflexión para concreto reforzado con fibras de polietileno con varios contenidos de fibra (velocidad del cabezal:20mm/min).....	20
Figura 2-10: Parámetros para análisis de gráficas según ASTM C1609 a) Carga máxima igual a primer pico de carga y b) Carga máxima mayor a primer pico de carga.....	21
Figura 3-1: a) Ajuste de escala en programa de procesamiento de imágenes ImageJ y b) Escala de referencia.....	31
Figura 4-1: Esquema ensayo a flexión ASTM C1609. ....	56
Figura 5-1: Esquema ensayo a flexión bajo cargas cíclicas.....	68
Figura 5-2: Configuraciones para medida de velocidad de pulso. a) Método Directo, b) Método semidirecto y c) Método indirecto. ....	80

## Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 3-1: Histograma diámetro equivalente ( $de$ ) - Método imagen digital.....	34
Gráfica 3-2: Histograma diámetro equivalente ( $de$ ) - Método indirecto.....	35
Gráfica 3-3: Curvas de distribución normal diámetro equivalente ( $de$ ) ambos métodos. ....	35
Gráfica 3-4: Carga-desplazamiento fibras a tensión. a) Muestra Patrón, b) Muestra 0%, c) Muestra 5%, d) Muestra 10% y e) Muestra 15%.....	39
Gráfica 3-5: Variación del esfuerzo máximo a tensión para diferentes concentraciones alcalinas. ....	41
Gráfica 4-1: Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) a los 28 días. ....	49
Gráfica 4-2: Módulo de elasticidad estático experimental $E_c$ .....	53
Gráfica 4-3: Coeficiente de poisson experimental ( $\nu$ ). ....	54
Gráfica 4-4: Carga-Deflexión vigas patrón (control) a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN. ....	58
Gráfica 4-5: Relación entre módulo de ruptura y esfuerzo a compresión.....	62
Gráfica 4-6: Relación de la tenacidad en función de $Vf$ ( $lf/de$ ) a) 19TMN y b)12.7TMN. ....	64
Gráfica 4-7: Tendencia de esfuerzos residuales a) $f_{300}$ y b) $f_{150}$ . ....	65
Gráfica 5-1: Patrón de carga C1.....	69
Gráfica 5-2: Patrón de carga C2.....	69
Gráfica 5-3: Carga-Deflexión después de C1 a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN.....	71
Gráfica 5-4: Carga-Deflexión después de C2 a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN.....	72
Gráfica 5-5: Variación de módulo de ruptura con carga C1 y C2. ....	75
Gráfica 5-6: Variación de la tenacidad con Carga C1 y C2. ....	76
Gráfica 5-7: Variación del esfuerzo residual $f_{300}$ con carga C1 y C2. ....	77
Gráfica 5-8: Evolución de la Tenacidad después de C1 y C2. a) 4.5kg/m <sup>3</sup> , b) 6.0kg/m <sup>3</sup> y c)7.5kg/m <sup>3</sup> . ....	78
Gráfica 5-9: Tendencia en la variación de la tenacidad con la cantidad de ciclos. ....	78
Gráfica 5-10: Variación de la velocidad de pulso antes y después de carga para diferente adición de fibra tipo de carga 1.....	82
Gráfica 5-11: Variación de la velocidad de pulso antes y después de carga para diferente adición de fibra tipo de carga 2.....	82

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Propiedades típicas de fibras sintéticas. ....	10
Tabla 3-1: Características principales de fibras (Según proveedor).....	28
Tabla 3-2: Medición de longitud de fibras por método manual.....	29
Tabla 3-3: Calibración de escala en programa de procesamiento de imágenes ImageJ. 31	
Tabla 3-4: Medidas por medios digitales de ancho y espesor de fibra - Cálculo de diámetro equivalente para sección rectangular.....	32
Tabla 3-5: Cálculo de diámetro equivalente para sección irregular.....	34
Tabla 3-6: Concentraciones de iones alcalinos de sodio y potasio. ....	37
Tabla 3-7: Cantidades de iones alcalinos para 300ml de referencia. ....	37
Tabla 3-8: Cargas máximas a tensión. ....	38
Tabla 3-9: Esfuerzo de tensión ( $\sigma_f$ ) .....	41
Tabla 4-1: Dosificación por $m^3$ para cada mezcla fabricada. ....	44
Tabla 4-2: Separación media entre fibras. ....	45
Tabla 4-3: Número de probetas por mezcla.....	46
Tabla 4-4: Fuerza máxima a compresión en cilindros a los 28 días.....	48
Tabla 4-5: Resumen de esfuerzo a compresión ( $f_c$ ) a los 28 días.....	49
Tabla 4-6: Módulo de elasticidad estático experimental.....	52
Tabla 4-7: Coeficiente de poisson experimental ( $\nu$ ).....	54
Tabla 4-8: Resumen de parámetros a flexión vigas patrón (control). ....	59
Tabla 4-9: Relación de la tenacidad y el módulo de ruptura con $\sqrt{f'_c}$ . ....	61
Tabla 4-10: Ecuaciones para módulo de ruptura teóricas vs experimentales. ....	62
Tabla 4-11: Resumen de parámetros de flexión $f_{300D}$ y $f_{150D}$ con respecto a módulo de ruptura.....	64
Tabla 5-1: Amplitud de carga cíclica.....	68
Tabla 5-2: Comportamiento de ablandamiento medido desde $P_{600}$ .....	69
Tabla 5-3: Resumen de parámetros de flexión después de carga C1.....	73
Tabla 5-4: Resumen de parámetros de flexión después de carga C2.....	74
Tabla 5-5: Evolución de la Tenacidad después de C1 y C2.....	78
Tabla 5-6: Resumen de velocidades por tipo de carga y mezcla. ....	81

## Lista de fotografías

	<b>Pág.</b>
Fotografía 3-1: MacroFibras sintéticas estructurales.....	27
Fotografía 3-2: Medición de longitud de fibras con calibrador digital. ....	29
Fotografía 3-3: a) Estereomicroscopio marca NIKON SMZ800 UN, sede Bogotá – Laboratorio Inter facultades de Ensayos Mecánicos y b) Método de sujeción de fibras. ....	30
Fotografía 3-4: Medida de ancho promedio y espesores relativos de sección transversal fibras a) P-2 y b) P-5. ....	31
Fotografía 3-5: Variación del ancho $w_f$ a lo largo de la longitud de la fibra. a) Escala 5mm y b) Escala 0.5mm.....	32
Fotografía 3-6: Registros individuales de peso de fibras.....	33
Fotografía 3-7: a) Equipo SHIMADZU-AUTOGRAPH y b) Mordaza 5kN.....	36
Fotografía 3-8: Fibras de polipropileno/polietileno en concentraciones de iones alcalinos.....	37
Fotografía 3-9: Fibra fallada a tensión a) Durante el ensayo y b) Imagen ampliada.....	38
Fotografía 3-10 Ensayo a tensión a) Muestra Patrón, b) Muestra 0%, c) Muestra 5%, d) Muestra 10% y e) Muestra 15%. ....	40
Fotografía 4-1: a) Mezclado, b) Formaletas y c) Curado. ....	46
Fotografía 4-2: a) Equipo ensayo compresión y b) Configuración parámetros de equipo. ....	47
Fotografía 4-3: Mecanismo de falla en cilindros a compresión. a) M01_0kg/m <sup>3</sup> , b) M02_1.8kg/m <sup>3</sup> y c) M03_6.0kg/m <sup>3</sup> . ....	50
Fotografía 4-4: Mecanismo de falla en cilindros a compresión. a) M04_0kg/m <sup>3</sup> , b) M05_4.5kg/m <sup>3</sup> y c) M06_7.5kg/m <sup>3</sup> . ....	50
Fotografía 4-5: a) Equipo SHIMADZU y b) Configuración e instrumentación ensayo módulo de elasticidad y relación poisson. ....	51
Fotografía 4-6: Configuración e instrumentación ensayo módulo de rotura. ....	55
Fotografía 4-7: Patrones de fisuras dúctiles ensayo a flexión ASTM C1609. a) Viga Mezcla M03 y b) Viga Mezcla M06.....	57
Fotografía 4-8: Patrones de fisuras frágiles ensayo a flexión ASTM C1609. a) Viga Mezcla M01 y b) Viga Mezcla M04.....	57
Fotografía 4-9: Secciones de falla a flexión. a)1.8kg/m <sup>3</sup> , b)6.0kg/m <sup>3</sup> , c)4.5kg/m <sup>3</sup> y d) 7.5kg/m <sup>3</sup> . ....	62
Fotografía 5-1 Medidor ultrasónico portátil Pundit Lab + de marca Proceq. UN, sede Bogotá – Laboratorio de Estructuras. ....	79
Fotografía 5-2: Montaje experimental para cálculo de velocidad de onda ultrasónica. a) Paralelo ancho probeta. b) Paralelo Largo probeta. ....	80

## Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI
<b>Mayúsculas</b>		
$A_f$	Área de sección transversal de la fibra	mm <sup>2</sup>
CV	Coeficiente de variación estadístico	%
D	Altura nominal de la viga	mm
$E_c$	Módulo de elasticidad del concreto	MPa
F	Fuerza de tensión aplicada	kN
$f_{600}^D$	Esfuerzo residual a deflexión neta L/600	MPa
$f_{150}^D$	Esfuerzo residual a deflexión neta L/150	MPa
L	Longitud o distancia entre apoyos	mm
$P_1$	Primer pico de carga	kN
$P_P$	Carga pico	kN
$P_{600}^D$	Carga residual a deflexión neta L/600	kN
$P_{150}^D$	Carga residual a deflexión neta L/150	kN
$R_{T,150}^D$	Esfuerzo a flexión equivalente	MPa
T	Carga de tensión máxima	N
$T_{,150}^D$	Área bajo la curva vs. Curva de deflexión neta	J
$V_f$	Volumen de adición de fibras	%
<b>Minúsculas</b>		
$b$	Ancho de la viga	mm
$d_e$	Diámetro equivalente de la fibra	μm
$f_1$	Primer pico de resistencia	MPa
$f_P$	Esfuerzo pico	MPa

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad SI</b>
$f'_c$	Esfuerzo a compresión del concreto medidos a 28 días	Mpa
$l_f$	Longitud equivalente de la fibra	mm
$m_f$	Masa de la fibra	g
$t_1, t_2, t_3, \dots$	Tiempo de llegada de onda ultrasónica	$\mu$ s
$t_f$	Espesor de la fibra	$\mu$ m
$v$	Velocidad de pulso ultrasónico	m/s
$w_f$	Ancho de la fibra	$\mu$ m

### **Símbolos Griegos**

$\delta_p = \delta_1$	Deflexión neta pico = Primer pico de deflexión	mm
$\delta_{max}$	Deflexión para carga máxima	mm
$\delta_u$	Deflexión última	mm
$\lambda$	$\lambda = l_f/d_e$ relación de aspecto	-
$\nu$	Relación de poisson	-
$\rho$	Densidad nominal del material	g/cm <sup>3</sup>
$\sigma_f$	Esfuerzo a la tensión de la fibra	GPa
$\Delta l$	Elongación del espécimen de la fibra	m
$\Delta L$	Desplazamiento del cabezal de carga del equipo	m

---

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>ACI</i>	American Concrete Institute
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>FIB</i>	Fédération Internationale du Béton
<i>FIER</i>	Índice de eficiencia intrínseca de la fibra -
<i>FRC</i>	Fiber Reinforced Concrete – Concreto Reforzado con Fibras
<i>JSCE</i>	Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (Japan Society of Civil Engineers)
<i>LVDT</i>	Linear Variable Differential Transformer
<i>NSR</i>	Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente
<i>NTC</i>	Norma Técnica Colombiana
<i>PFRC</i>	Polypropylene Fiber Reinforced Concrete – Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno
<i>PE</i>	Polietileno
<i>PP</i>	Polipropileno
<i>RILEM</i>	Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux)
<i>TMN</i>	Tamaño máximo del agregado nominal
<i>UN</i>	Universidad Nacional de Colombia
<i>UPV</i>	Velocidad de pulso ultrasónico



# Capítulo 1. Introducción

El concreto reforzado con fibras (FRC) de sus siglas en inglés “fiber reinforced concrete” es un material compuesto que se emplea en la mayoría de los casos para controlar el agrietamiento en el concreto. Las fibras, a diferencia del refuerzo tradicional son discontinuas, relativamente cortas, se distribuyen generalmente con poco espacio entre ellas y aleatoriamente dentro de la matriz de concreto generando un mecanismo de enlace con la capacidad de absorber energía de deformación elástica y plástica permitiendo la transferencia de tensiones de manera uniforme a través de las micro fisuras mejorando de esta forma las propiedades del concreto en todas las direcciones (ACI Committee 544.1R, 2009) y (Rai & Joshi, 2014).

En las últimas décadas se ha incrementado el uso de fibras en elementos estructurales por ser un material efectivo como solución al deterioro creciente de la infraestructura a nivel mundial con concretos reforzados convencionalmente (Wang et al., 1987), económicamente más viable debido a la reducción de espesores y por ende amigable con el medio ambiente con un menor impacto en la huella de carbono (Ali et al 2020, Euclid Chemical Company, 2015). Múltiples investigaciones, estudios internacionales y nacionales se han desarrollado acerca de las ventajas de la adición de fibras en el comportamiento global del material compuesto y se ha encontrado que estas no solo ayudan a controlar el agrietamiento y la propagación de fisuras en el concreto como se creía principalmente, sino que además mejoran algunas propiedades físicas del concreto reforzado como la resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, tenacidad, resistencia a la flexión, resistencia a cargas dinámicas (impacto, fatiga, explosiones, o eventos sísmicos), entre otras (ACI Committee 544.1R, 2009) (Bentur & Mindess, 2007).

Adicionalmente, debido a la naturaleza heterogénea del FRC sus propiedades mecánicas están intrínsecamente relacionadas con el comportamiento y calidad individual de sus materiales, así como de sus características geométricas, entre ellas, longitud, sección transversal, relación de aspecto, forma, orientación y distribución dentro de la matriz, son

de gran importancia en la interacción entre la interfaz fibra-matriz y propiedades mecánicas como la adhesión, la extracción y la flexión se ven directamente influenciadas por estas.

El comité del ACI 544 clasifica el concreto reforzado con fibras dependiendo del tipo de material en cuatro categorías (siglas en inglés), concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC), concreto reforzado con fibras de vidrio (GFRC), concreto reforzado con fibras naturales (NFRC) y concreto reforzado con fibras sintéticas (SNFRC), las cuales a su vez se subdividen en más categorías, dependiendo de su tamaño se clasifican en micro-fibras sintéticas (para diámetros menores a 0.30mm) y macro-fibras sintéticas (para diámetros mayores a 0.30mm). Por otro lado, estas últimas, se clasifican además por el tipo de polímero del que están fabricadas y por el rango de su módulo de elasticidad el cual varía entre 15 a 480 GPa en fibras de bajo módulo y fibras de gran módulo. (Bentur & Mindess, 2007) (Wang et al., 1987).

Las fibras de polipropileno y de polietileno corresponden al grupo de macro-fibras sintéticas de bajo módulo. Investigaciones tanto teóricas como experimentales han demostrado que incluso con bajo módulo se han observado mejoras considerables en el desempeño mecánico del concreto, además de ventajas tales como ser de menor peso y más económicas con respecto a las fibras metálicas (Bentur & Mindess, 2007). Las fibras de PP son conocidas por ser “hidrófobas”, lo que significa que no absorben agua durante el mezclado y el posterior curado, por lo tanto, son resistentes a la corrosión, sin embargo, que “repelen” el agua representa una gran desventaja ya que dificulta la dispersión y la adhesión entre estas y la matriz cementicia (ACI Committee 544.1R, 2009).

Investigaciones han concluido que la incorporación de fibras de polipropileno (PP) no mejora significativamente las propiedades antes de la resistencia pico ya que la matriz de concreto falla relativamente al mismo esfuerzo que un concreto simple. Las ventajas de estas se ven por lo tanto después de la fisuración debido a la capacidad de las fibras de trabajar como puente de transferencia de cargas previniendo fallas frágiles, aumentando la resistencia a la flexión y tenacidad o capacidad de absorción de energía del material, este comportamiento ha sido ampliamente estudiado alrededor del mundo (Kobayashi y Cho, 1981) (Wang et al., 1987) (Ramakrishnan et al., 1994) (Wu, 2002) (Sukontasukkul, 2004) (Carmona et al., 2009) (Carnovale, 2013) (Behdoui et al., 2013) (Broda & Brachaczek, 2015) (Dopko, 2018), entre otros.

La contribución de las fibras en el comportamiento mecánico como la resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, tenacidad, resistencia a la flexión, entre otras, por lo general está directamente relacionada con el volumen de fibras adicionado. La cantidad de fibras de PP recomendada por la mayoría de productores y ratificadas por los estudios varía entre 0.2 – 1.5% del volumen de concreto, dosificaciones menores no resultan prácticas, pues no se altera el comportamiento de la matriz mientras que dosificaciones mayores resultan difíciles de manejar, afectando la trabajabilidad del concreto.

De acuerdo con lo anterior, este trabajo final se centrará en el estudio en particular del concreto reforzado con fibras de polipropileno (PFRC) y debido a que en el mercado las fibras disponibles son una mezcla de polipropileno y polietileno se abarcará por lo tanto el estudio del comportamiento mecánico en particular de la fibra y la influencia del material compuesto en la matriz cementicia.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Evaluar la incidencia del número de ciclos de carga y descarga sobre el comportamiento mecánico de elementos de concreto reforzados con fibras de polipropileno.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las propiedades mecánicas de fibras de polipropileno usadas en la investigación.
- Evaluar el efecto a la exposición en ambientes alcalinos de fibras de polipropileno sobre su desempeño mecánico.
- Evaluar la influencia del número de ciclos de carga y descarga sobre las propiedades mecánicas en elementos de concreto reforzados con fibras de polipropileno.

## **1.2. Planteamiento del Problema y Justificación**

El uso de fibras como único refuerzo para el concreto es un tema de interés en el área de materiales de ingeniería por su creciente uso, principalmente en estructuras civiles en las

cuales la presencia de refuerzo continuo no es necesario para la seguridad e integridad de estas tales como: carreteras, pavimentos, concreto lanzado para estabilización de taludes, losas de parqueaderos y losas o pisos industriales sobre el terreno. Estas estructuras están expuestas a cargas frecuentes y repetitivas de gran magnitud de naturaleza cíclica como las del tráfico que deterioran la estructura del concreto ocasionando daño por fatiga produciendo microfisuras localizadas y reducción por lo tanto de la resistencia y la rigidez del elemento (Mohod & Kadam, 2016). El deterioro de estas estructuras es motivo de preocupación debido a que su reparación y rehabilitación consume tiempo y costos.

Como es sabido de investigaciones anteriores, el uso de fibras de polipropileno para refuerzo del concreto disminuye el deterioro del material a nivel macro aumentando su vida útil; sin embargo, a nivel microscópico al mismo tiempo dentro de la matriz cementicia ocurren procesos de degradación química de la fibra a causa de los ataques debidos a la reacción altamente alcalina de la pasta que pueden afectar la resistencia de estas y, por lo tanto, el comportamiento del material compuesto.

Debido a la falta de conocimiento, guías de diseño y especificaciones de construcción, el uso de fibras de PP en el concreto es limitado, por lo tanto, existe la necesidad de conocer las propiedades del concreto reforzado con fibras de Polipropileno de uso nacional con el fin de conocer su comportamiento a flexión cuando está sujeto a cargas estáticas y cíclicas. Y el efecto a la exposición en ambientes alcalinos de fibras de polipropileno sobre su desempeño mecánico.

### **1.3. Organización del Trabajo**

Este documento presenta los resultados, análisis y conclusiones del trabajo experimental desarrollado con el fin de conocer el comportamiento mecánico de las fibras de PP usadas en la investigación y a su vez el desempeño a flexión cuando los elementos han estado sujetos a cargas de naturaleza cíclicas. Para su total entendimiento, se organizó el documento en los siguientes capítulos:

En el primer capítulo se realiza una breve reseña de la motivación, objetivos y justificación de esta investigación.

---

En el capítulo siguiente se realiza un resumen de manera general de las investigaciones referentes en el tema y los puntos más destacados con los cuales este trabajo final se apoya para su desarrollo.

La primera parte de la fase experimental se presenta en el capítulo 3, la instrumentación, calibración, verificación de métodos para ensayo a tensión y para cálculo de área de fibras con el fin de obtener resistencia a la tensión.

El capítulo 4 se dedica al desarrollo de la segunda fase experimental, fabricación de probetas y cilindros, vaciado, curado, etc. Se determinan las principales propiedades del material compuesto a compresión, su módulo de elasticidad, relación de poisson, resistencia a la flexión, tenacidad, ductilidad, entre otras.

La última parte de la investigación (Programa experimental parte III) se describe en el Capítulo 5: "Comportamiento a flexión de vigas bajo cargas cíclicas", se define la amplitud de la carga cíclica, configuración y calibración de la máquina universal para aplicación de esta, se calcula la tenacidad y se presenta el análisis de resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones encontradas de las fases experimentales y se dan algunas recomendaciones para futuras líneas de investigación.

Por otro lado, se ha considerado oportuno anexar la información complementaria a este trabajo final, como son granulometría de los agregados, hoja de datos de materiales usados en la investigación, desarrollo del diseño de las mezclas y dimensionamiento de probetas.



## Capítulo 2. Marco Teórico

Históricamente el hombre ha utilizado diferentes tipos de fibras para reforzar materiales frágiles como el concreto con el fin de mejorar su desempeño frente a las distintas sollicitaciones a las que están expuestos, es así como nace el concepto de concreto reforzado con fibras (FRC). Y como su nombre lo indica, consiste en una matriz de concreto reforzado internamente con fibras, las cuales pueden ser de distintos materiales como vidrio, naturales o las más comúnmente utilizadas alrededor del mundo, de acero y sintéticas, siendo estas últimas de materiales como polietileno, polipropileno, acrílicos, polivinilo, aramida, entre otros.

Las primeras investigaciones sobre el potencial de las fibras en especial las fibras de acero como refuerzo del concreto se hicieron durante los años sesenta en Estados Unidos (ACI Committee 544.1R, 2009), en estas investigaciones se evaluó el comportamiento del material compuesto frente a cargas estáticas y se evidenció que estas ayudaban a mejorar sus propiedades mecánicas como la resistencia al agrietamiento, la capacidad de absorción de energía o tenacidad y la ductilidad. Investigaciones posteriores han demostrado además, que la adición de fibras en el concreto mejora la resistencia a la fatiga y al impacto producidas por cargas dinámicas (Buratti et al., 2011).

Sin embargo, hasta la década del 70 gracias a los avances tecnológicos, la búsqueda de materiales más resistentes y la producción en cadena fueron desarrolladas las fibras sintéticas con el fin de emular a las fibras naturales (Bunsell, 2018), el resultado fue una gran gama de fibras de diferentes materiales, formas y tamaños disponibles tanto para uso textil como para elementos estructurales (Bunsell, 2018), (Bentur & Mindess, 2007). Las fibras sintéticas permitieron ofrecer en el mercado un amplio rango de tipos de fibras las cuales tenían mejor comportamiento que sus homólogas metálicas y naturales, ya que disminuían en mayor proporción el tamaño de las grietas. Según Ramakrishnan et al., (1994) la adición de estas fibras podía proporcionar un refuerzo igual de eficaz comparado con las fibras de acero.

## **2.1. Introducción, Ensayo y Caracterización de Fibras**

Algunas propiedades únicas de las fibras sintéticas y en específico de las fibras de polipropileno (PP) que las hacen adecuadas para su uso en el concreto es que son químicamente inertes, no corrosivas y tienen una alta resistencia química a los ácidos minerales, bases y sales inorgánicas. Según (Ramakrishnan et al., 1994) estas son muy estables y no absorben agua, tienen una alta resistencia a la tracción y son económicas de usar. En los siguientes subcapítulos se presentan principales propiedades estudiadas de las fibras.

### **2.1.1. Dimensiones de las Fibras**

Actualmente existen varios métodos y estándares internacionales relacionados con la caracterización de las fibras geoméricamente, tal como el desarrollado por el subcomité A01.05 del ASTM (ASTM A820/A820M, 2011) para fibras metálicas en el que se establecen límites dimensionales admisibles, coeficientes de variación, tolerancias de aceptación, rechazo del material, entre otros. Así como, la especificación europea creada particularmente para fibras poliméricas (BS-EN-14889-2, 2006) la cual establece no solo límites y tolerancias de dimensiones de la fibra, sino que propone adicionalmente fórmulas para el cálculo del diámetro equivalente dependiendo de la forma (circular, elíptica, rectangular o irregular) de la sección transversal. Determinar correctamente el diámetro de la fibra es de vital importancia ya que este es un parámetro dimensional que está directamente relacionado con el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras (FRC) (Cáceres et al., 2015).

Por otro lado, el manual de propiedades de fibras textiles y técnicas (BS-EN-14889-2, 2006), expone tres métodos para determinar las dimensiones, método de pesaje, método vibracional y método del análisis de la sección transversal mediante análisis de imágenes y microscopía óptica.

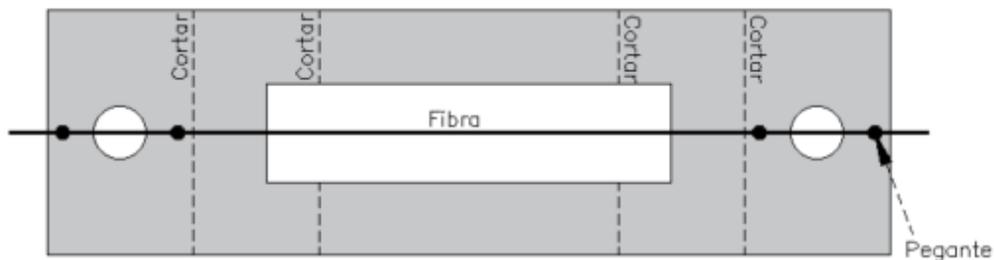
El método de pesaje consiste según (BS-EN-14889-2, 2006) en determinar el área transversal partiendo de una dimensión conocida como la longitud y calculando la densidad lineal de la fibra, este método resulta efectivo para secciones irregulares. Otros autores como Cáceres et al., (2015) para este mismo método, determinan la masa de una fibra individual con ayuda de balanzas de alta precisión 0.0001g y evalúan la densidad con

ayuda de un picnómetro de helio a 26°C. El método vibracional, por otro lado, consiste en utilizar el principio de vibración de las cuerdas con el fin de obtener de esta forma la densidad lineal. Por último, el cálculo de la sección transversal por medio de análisis de imágenes digitales o microscopía ha sido muy útil para medir directamente las secciones transversales de las fibras. Este procedimiento consiste en incrustar las fibras en una resina o en un material adecuado con el fin de sujetarlas y medir o estimar el área con las herramientas de programas para análisis de imágenes. Esta técnica llamada “histología” fue desarrollada principalmente para el estudio de los materiales biológicos, pero ha sido de gran ayuda para la determinar las dimensiones en elementos de la escala de las fibras.

### 2.1.2. Procedimiento de Ensayo a Tensión

El estándar de ensayo (ASTM C1557, 2014) es el comúnmente más usado para determinar la tensión y el módulo de elasticidad de la fibra, en este se presenta el método que se debe seguir para el montaje y los cuidados a tener para evitar desalineamientos que causen errores en la medición. Autores como Bunsell, (2018) dan pautas de cómo se puede realizar el montaje teniendo en cuenta la gran variedad de fibras que existen en el mercado. Tanto en la ASTM como Bunsell, (2018) coinciden en que algunos tipos de fibra se pueden montar directamente sobre las mordazas, cuando sea necesario las empuñaduras se pueden proteger utilizando papel adhesivo o cinta. Para el caso de fibras débiles o quebradizas se sugiere montar la fibra sobre guías en papel, cartón (como se indicada en la figura 2-1) o incluso marcos en tela. Según Cáceres et al., (2015) estos mejoran la adherencia y la fricción entre la fibra y las mordazas de la máquina de prueba.

**Figura 2-1:** Marco para prueba a tensión de fibras.



Nota. Adaptado de *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, por A. R. Bunsell, *The Textile Institute Book Series*, 2018, p.43

### 2.1.3. Comportamiento a Tensión de las Fibras

Las propiedades mecánicas más importantes de las fibras son la resistencia a la tensión y el módulo elasticidad. La resistencia a la tensión afecta directamente el comportamiento posterior al agrietamiento del FRC. Después del agrietamiento se produce una transferencia de tensiones de la matriz a las fibras, tal como lo mencionan varios autores (ACI Committee 544.1R, 2009) (Ramakrishnan et al., 1994) (Cáceres et al., 2016), (Bentur & Mindess, 2007). Por lo tanto, en cuanto mayor sea la resistencia a la tensión de la fibra, mayor será la capacidad de resistencia residual del elemento compuesto.

En la tabla 2-1 a continuación se presenta un resumen de las propiedades mecánicas típicas de las fibras sintéticas comercialmente más usadas, (los valores indicados en la tabla pueden variar dependiendo del proveedor de la fibra):

**Tabla 2-1:** Propiedades típicas de fibras sintéticas.

Tipo de Fibra	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Esfuerzo a la tensión (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación última (%)
Acrílico	20-350	0.2-1.0	14-19	10-50
Aramida (Kevlar)	10-12	2.3-3.5	63-120	2-4.5
Polietileno	25-1000	0.08-0.60	5	3-100
Polipropileno	20-400	0.45-0.76	3.5-10	15-25
Acero (por comparación)	100-1000	0.5-2.6	210	0.5-3.5
Matrix de cemento	-	0.003-0.007	10-45	0.02

Nota. Adaptado de *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, por Bentur, A., & Mindness, S. (2007), p.369.

Las propiedades de las fibras indicadas en la tabla anterior, tales como, su módulo de elasticidad ( $E_f$ ), esfuerzo a la tensión ( $\sigma_f$ ), deformación ( $\epsilon$ ), así como la cantidad agregada, tamaño y forma, influyen notablemente en el comportamiento del material compuesto (Wu, 2002).

## 2.2. Alcalinidad de la Pasta y Degradación de las Fibras

“Los mayores componentes del cemento Portland son silicatos de calcio y aluminio los cuales cuando reaccionan con el agua generan una solución fuertemente alcalina (pH entre 10 y 13) de hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ )” (Wang et al., 1987, P.4282). El humo de sílice es un coproducto de la producción de silicio o ferrosilicio metálico que ayuda a reducir los álcalis de la solución de poros y mejora en más de un 35% la unión interfacial (Bentur & Mindess, 2007).

Rostami et al., (2019) estudiaron el efecto de la alcalinidad del concreto en el comportamiento de concretos reforzados con fibras de polietilentereftalato (PET) y de polipropileno (PP). Las fibras de polipropileno (PP) no presentaron una reducción significativa de resistencia. Sin embargo, las fibras de PET presentaron una disminución considerable en la resistencia a la tensión entre 4% y 7% debido al tratamiento alcalino, además de una pérdida de peso de casi 0.87%.

Por otro lado, según Bentur & Mindess, (2007):

La degradación de las fibras a causa de ataques químicos puede ocurrir por dos procesos, el primero está directamente relacionado a que reaccione con la naturaleza alcalina de la pasta ( $\text{pH} > 13$ ) y el segundo es que agentes externos penetren a través de la matriz y afecten la fibra, los mecanismos son diferentes pero el resultado es el mismo, reducción de la resistencia y la tenacidad del elemento con el tiempo.

Adicional a lo anterior Segre et al., (1997) estudiaron la reacción de las fibras cuando han sido expuestas a concentraciones de  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , agua de mar sintética y una solución de agua con cemento a diferentes temperaturas y tiempos de exposición, de lo anterior se encontró una marcada oxidación después de 100 días para las fibras expuestas a la solución de agua-cemento en comparación con las otras mezclas y un aumento de peso molecular determinado por medio de viscosimetría. Si bien, las fibras sintéticas son altamente resistentes a los agentes químicos de los ácidos, álcalis y sales (Bentur & Mindess, 2007), (Rostami et al., 2019), entre otros, la exposición a estos agentes puede generar cambios irreversibles en la estructura interna molecular de estas (Segre et al., 1997).

Por otro lado, Cáceres et al., (2016) estudiaron la degradación de las fibras debido a la abrasión del mezclado de los agregados evaluando tanto las propiedades mecánicas como las geométricas de dos tipos de fibras de polipropileno (fibras en paquete (bundle) y fibras unitarias), encontrando que para las fibras en paquete el área calculada por medio del método de la densidad unitaria, tuvo un incremento en casi un 10%; sin embargo, su esfuerzo a la tensión tuvo una reducción del 6%. En las fibras unitarias por otro lado, su área no tuvo variación alguna con respecto a las fibras en estado natural y su esfuerzo a la tensión se redujo casi en 21% aproximadamente. Finalmente Cáceres et al., (2016) concluyen que el ensayo a tensión sobre las fibras sirve de control para determinar la degradación de las fibras debida a la abrasión por el mezclado.

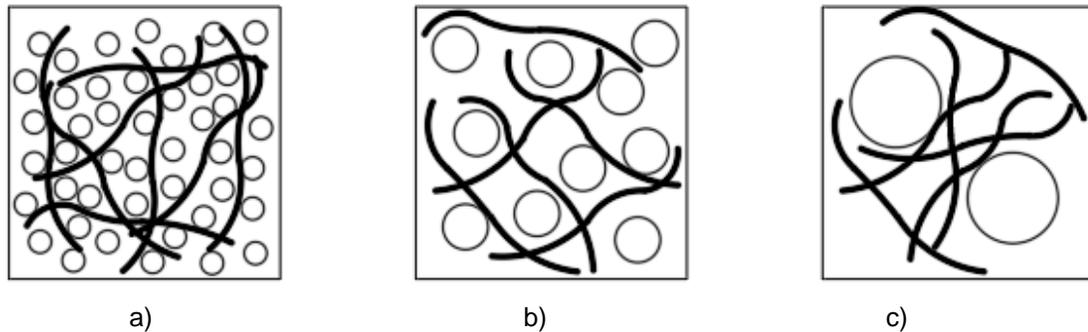
## **2.3. Propiedades Mecánicas del PFRC – Investigaciones Experimentales**

Diversos estudios se han realizado con el fin de caracterizar el material compuesto, pero en todos hay un gran número de variables con respecto a la forma, tamaño y porcentaje de adición de fibra el cual varía por lo general entre un 0.1 y 10% del volumen. Dada la gran variedad de variables del material compuesto mencionadas y además de calidad de materiales, la dispersión de resultados es bastante grande incluso se han encontrado resultados contradictorios para una misma propiedad mecánica (ACI Committee 544.1R, 2009). En las siguientes secciones se hará una breve reseña de las investigaciones con más relevancia para la caracterización del material compuesto.

### **2.3.1. Proporción de Agregados**

El ACI Committee 544.3R, (2008) recomienda tamaños de agregados menores a 19mm (0.75in), debido a que tamaños más grandes afectan la distribución de la fibra limitando la movilidad de esta dentro de la matriz, sin embargo tamaños de agregados de hasta 38mm se han usado sin que se vea afectadas las propiedades de la mezcla. En la figura 2-2 se puede observar el efecto del tamaño en la distribución de las fibras. En varias investigaciones se recomiendan que los tamaños máximos de los agregados no superen dos tercios ( $2/3$ ) de la longitud máxima de la fibra y un quinto ( $1/5$ ) del lado menor del elemento.

**Figura 2-2:** Efecto del tamaño del agregado en la distribución de las fibras. a) 12.7mm, b) 19mm y c) 25.4mm.



Nota. Adaptado de Fiber Cements and Fiber Concretes, por D. J. Hannant, Wiley-interscience, 1978.

Por otro lado, autores como Krenchel, H (1975) plantean que para que exista una adherencia eficaz entre la matriz de concreto y la fibra, el tamaño máximo del agregado debe estar en función de la fracción volumétrica empleada ( $V_f$ ) y el área transversal equivalente de la fibra ( $A_e$ ), permitiendo, que este sea máximo dos veces la separación media entre fibras, para el cálculo de esta separación proponen la siguiente expresión:

$$Sm = 1/\sqrt{n} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde n corresponde al número de fibras que atraviesan un plano cualquiera con cualquier inclinación y se obtiene con la siguiente ecuación:

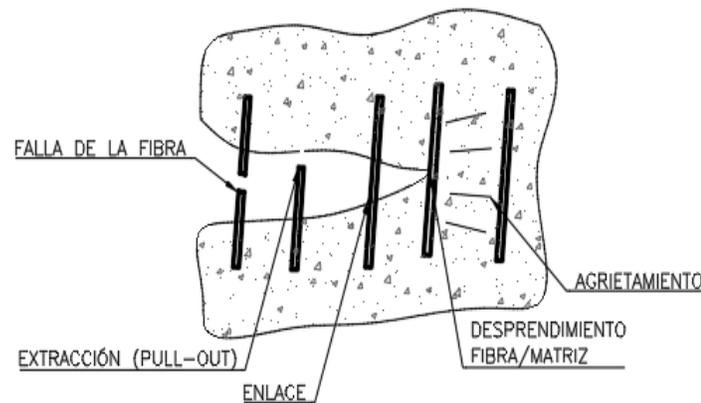
$$n = \frac{2V_f}{\pi A_e} \quad \text{Ec. 2-2}$$

### 2.3.2. Mecanismo de Trabajo de las Fibras

La propagación de fisuras en el concreto es un fenómeno inevitable debido a la naturaleza frágil de este, las primeras fisuras que se evidencian en la matriz son las generadas por la contracción plástica, las micro fisuras generadas por los esfuerzos de tracción siguen creciendo hasta el punto de que las tensiones superan la capacidad de la matriz, esta se vuelve inestable y el material falla por fractura. Las fibras por lo tanto empiezan a trabajar desde estados tempranos de fisuración alterando de esta forma los patrones y modos de falla (ACI Committee 544.4R, 2018). Después de agrietada la matriz, las fibras trabajan

uniendo o cosiendo las grietas y estas empiezan a soportar tensiones, dando capacidad de carga en su estado agrietado. La tenacidad es la medida de la capacidad del elemento de seguir absorbiendo energía después del agrietamiento gracias a los procesos de despegado y extracción “*debonding and pull-out*”, Bentur & Mindess, (2007) afirman que el éxito de estos procesos está relacionado con la orientación tridimensional y distribución aleatoria de las fibras dentro de la matriz cementicia.

**Figura 2-3:** Esquema de mecanismo de trabajo de la fibra.



Nota. Adaptado de Fiber Cements and Fiber Concretes, por D. J. Hannant, Wiley-interscience, 1978.

Las etapas que se pueden describir de la figura 2-3 involucradas en la falla del concreto reforzado con fibras (de derecha a izquierda) son: 1. Formación de grietas en la matriz de concreto, 2. Desprendimiento y deslizamiento entre fibra-matriz, 3. Puente de adherencia entre fibra y matriz, 4. Deslizamiento por fricción, deformación del anclaje y eventual extracción de la fibra, 5. Falla, la fibra ya no es capaz de resistir más tensiones.

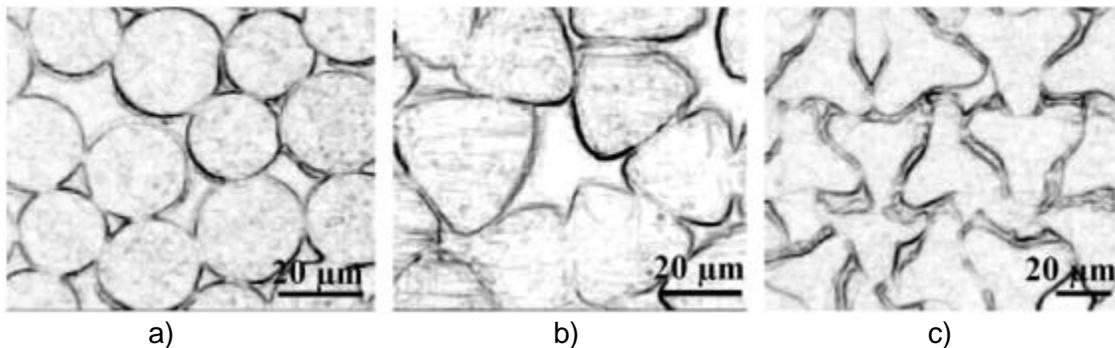
### 2.3.3. Influencia de la Dosificación, Longitud y Sección Transversal de las Fibras en las Propiedades Mecánicas del PFRP

La decisión de escoger el tipo de fibra, longitud, diámetro, relación de aspecto ( $l_f/d_e$ ) y la dosificación depende de la aplicación estructural y de la exposición ambiental (ACI Committee 544.4R, 2018). Debido a su estructura química, las fibras de polipropileno como se ha descrito previamente tienen una adhesión pobre con la matriz de cemento, la adhesión entre esta interfaz es por lo tanto por medios mecánicos (ACI Committee 544.1R, 2009), y en ese sentido, la sección transversal de la fibra se vuelve un parámetro

fundamental que condiciona el comportamiento físico del material compuesto. Por lo anterior, se puede asegurar que el comportamiento post-pico a flexión está intrínsecamente relacionado con la forma y el volumen adicionado de fibra (Wu, 2002).

Pakravan et al., (2015) investigaron la influencia de la geometría en las propiedades mecánicas del concreto reforzado sustituyendo parcialmente el refuerzo de fibras de polivinilo (PVA) por fibras de polipropileno (PP) de sección transversal circular, triangular y trilobal, como se observa en las micrografías de la Figura 2-4. Y encontraron que para los elementos reforzados con fibras de sección circular la tenacidad del elemento se redujo en comparación con las secciones triangulares y trilobales en las que se incrementó el área bajo la curva entre un 63-74%, respectivamente.

**Figura 2-4:** Sección transversal de fibras de polipropileno: a) circular, b) triangular y c) trilobal.



Nota. Tomado de (Pakravan et al., 2015).

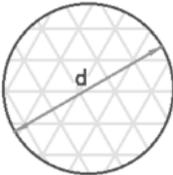
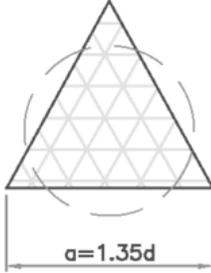
Otros autores igualmente han estudiado la influencia de la sección trasversal y la longitud de las fibras en las propiedades mecánicas, tal como Broda & Brachaczek, (2015) que encontraron que para secciones transversales con forma de estrella el esfuerzo a flexión para los morteros tuvo una mejora razonable con respecto a los reforzados con fibras de sección circular. En ese sentido (Naaman, 2003, como se citó en Bentur, 2007) definió un parámetro para determinar la eficiencia del anclaje proporcionado por la sección transversal de la fibra denominado “Índice de eficiencia intrínseca de la fibra” (FIER), el cual está en función del perímetro ( $\psi$ ), la longitud de la fibra ( $l$ ) y el área de la sección ( $A$ ), el cuál puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$FIER = \psi l / A$$

**Ec. 2-3**

Tomando como base el valor normalizado de un FIER igual a la unidad para una sección circular, en la figura 2-5 se puede observar el índice de eficiencia para secciones transversales comunes de fibras de polipropileno:

**Figura 2-5:** Índice de eficiencia intrínseca FIER para secciones comunes.

FIBRA CIRCULAR	FIBRA TRIANGULAR (A)	FIBRA SIMILAR A LA TRIANGULAR (B)
 <p>Fibra circular de referencia de diámetro (d), área (A) y perímetro <math>\pi d</math>.</p> <p>FIER = 1.00</p>	 <p>Fibra triangular de lado (a), tiene la misma área que la fibra circular pero un perímetro 28% mayor.</p> <p>FIER = 1.28</p>	 <p>Fibra similar a la triangular tiene el mismo perímetro que una fibra circular de diámetro d, pero solo el 45% del área.</p> <p>FIER = 2.20</p>

Nota. Adaptado de *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, por Bentur, A., & Mindness, S. (2007), p.517.

### 2.3.4. Comportamiento a Compresión

Se ha encontrado que la adición de fibras en la masa de concreto para pequeños porcentajes de adición (<0.25%) puede aumentar su capacidad de carga hasta en un 10%; sin embargo, por el contrario para adiciones mayores (>0.75%) esta puede disminuir casi en un 8% comparada con un concreto simple (Nkem, A., Ige, A., 2014) se puede concluir, por lo tanto, que el uso de fibras cortas en el concreto no modifica significativamente la resistencia a la compresión de este (Abousnina et al., 2021), (Bentur & Mindess, 2007), (Rai & Joshi, 2014), (Broda & Brachaczek, 2015).

### 2.3.5. Módulo de Elasticidad del Concreto

El módulo de elasticidad mide la variación del esfuerzo con relación a la deformación unitaria en el rango elástico, es calculado de la pendiente de la parte recta de la curva esfuerzo contra deformación unitaria, es una medida de la rigidez o de la resistencia a la

deformación del material, por lo tanto, es una de las propiedades más importantes usadas para el diseño de estructuras ya que es un parámetro necesario para determinar tanto las deformaciones como las frecuencias de los comportamientos estáticos y dinámicos de estructuras (Suksawang et al., 2018).

Según Suksawang et al., (2018) el agregado grueso tiene un gran impacto en el módulo de elasticidad del concreto debido a su rigidez y proporción volumétrica en la mezcla, se encontró que para proporciones de agregado grueso a fino (G/F) menores que la unidad, el módulo elasticidad disminuyó notablemente.

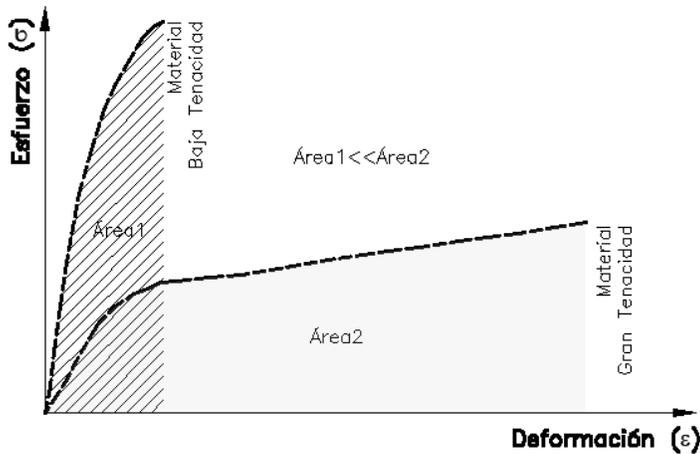
### **2.3.6. Desempeño y Tenacidad del Concreto Reforzado con Fibras**

Para la caracterización de la mayoría de los materiales se evalúan parámetros mecánicos como esfuerzo a la compresión, tracción, entre otros. Sin embargo, para concretos reforzados con fibras (FRC) a diferencia de los otros materiales, estos parámetros no son suficientes para la caracterización del comportamiento del material (Sukontasukkul, 2004) es necesario por lo tanto medir la tenacidad debido a la flexión.

La tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía y es usada para determinar la capacidad de los materiales para resistir cargas cuando están bajo sollicitaciones estáticas, dinámicas y de impacto. Esta se obtiene directamente calculando el área bajo la curva del ensayo de tracción directa; sin embargo, los inconvenientes para la realización de este ensayo debido a la complicada sujeción de la probeta limitan su uso. No obstante, la tenacidad puede ser calculada de la gráfica carga-deflexión de un ensayo de flexión pura sobre una viga con cargas a sus tercios (ACI 544 2.R, 1996). Según Arivalagan, S. (2012) la adición de fibras mejora considerablemente la capacidad de absorción de energía de los elementos a flexión.

En la figura 2-6 se muestra esquemáticamente la tenacidad para dos tipos de materiales comparando su área bajo la curva, uno con una gran capacidad de resistir cargas, pero baja capacidad de deformación (Área 1) que indica poca tenacidad y otro con una capacidad moderada de resistir cargas, pero una gran capacidad de deformación (Área 2) que indica una gran tenacidad.

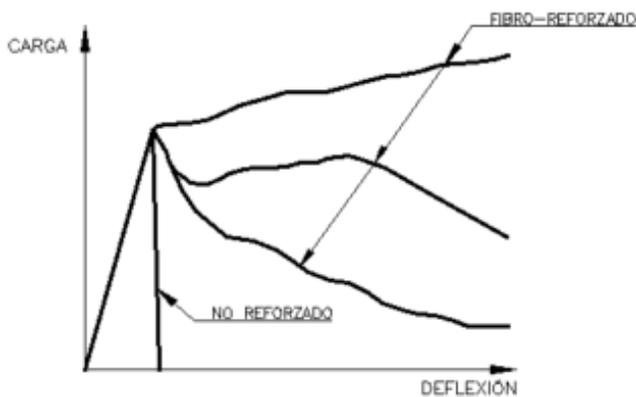
**Figura 2-6:** Representación esquemática del área bajo la curva, comparación entre la tenacidad de dos diferentes tipos de materiales.



Nota. Adaptado de *Balancing the Toughness and Strength in polypropylene Composites*, por Shirvanimoghaddam et al. (2021), p.5.

La adición de fibras en el concreto definitivamente cambia el comportamiento de la matriz con respecto a un concreto simple, los elementos bajo una condición de carga de flexión pura fallan de una manera frágil y la fractura ocurre de forma instantánea una vez el concreto alcanza la carga máxima, sin embargo, para los concretos adicionados con fibras gracias al mecanismo de trabajo de la interfaz fibra-matriz se crea un puente de adherencia (ver figura 2-3) que controla la tasa de liberación de energía conservando la capacidad de carga. La figura 2-7 muestra curvas típicas de comportamiento a flexión de un concreto simple y de concretos reforzados con diferentes dosificaciones o diferente material de fibras.

**Figura 2-7:** Rango de carga-deflexión para matriz no reforzada y fibro-reforzada.

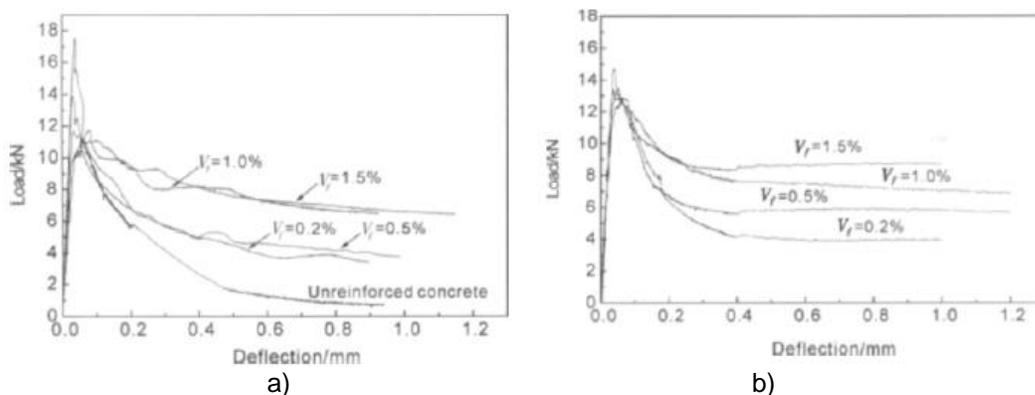


Nota. Adaptado de *Report of Fiber Reinforced Concrete ACI 544.1R (2009)*, p.3.

Como se puede observar en las curvas de esfuerzo-deflexión, después de la primera fisuración pueden existir dos tipos de comportamientos; el primero denominado como *strain softening* (dúctil) o comportamiento de ablandamiento para materiales compuestos con fibras de módulo limitado o una cantidad mínima y el segundo llamado *strain hardening* (tenaz) o comportamiento de endurecimiento para materiales compuestos con fibras de grandes módulos (acero, kevlar) o una gran cantidad de cuantía volumétrica adicionada.

Wu, (2002) estudió el esfuerzo y la deflexión para vigas de sección cuadrada de 100x100mm y longitud entre apoyos igual a 300mm ensayadas a flexión en cuatro puntos de apoyo según la norma ASTM C1018 (Actualmente desactualizada y no activa en ASTM) para dos tipos de fibras de polipropileno y cuatro diferentes dosificaciones. Wu encontró una reducción del esfuerzo a la flexión y menciona que este comportamiento puede ser explicado fácilmente por la ley de las mezclas ya que el esfuerzo del material compuesto está en función, entre otros, del módulo de elasticidad de la fibra el cual es aproximadamente un cuarto del concreto y de otros factores empíricos que resultan menor que la unidad. También indica que la reducción del esfuerzo a la flexión es ocasionada por la presencia de vacíos de aire ya que al agregar fibras en la mezcla se aumenta la viscosidad y estas partículas de aire no pueden escapar. En la figura 2-8 se muestran curvas carga-deflexión del estudio realizado por Wu, (2002) donde se puede observar claramente el comportamiento "*softening*" para diferentes fibras de polipropileno.

**Figura 2-8:** Curvas de carga-deflexión para dos tipos de fibras de polipropileno. a) Polipropileno extruido y b) Polipropileno fibrilado.



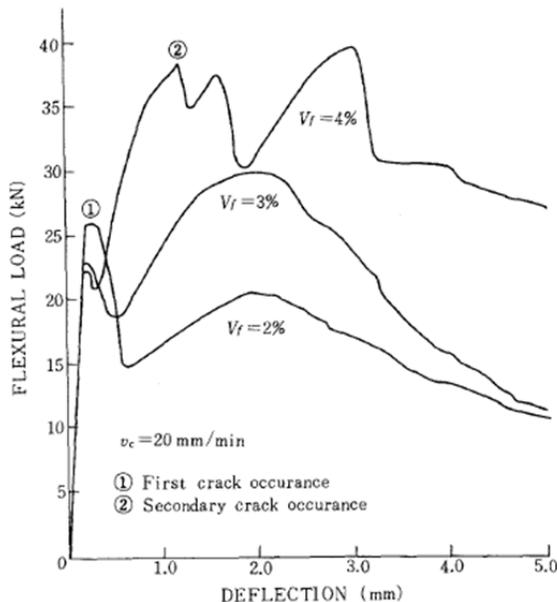
Nota. Tomado de *Flexural Strength and Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams*, por Wu, (2002), p.56.

Adicionalmente y como han mencionado otros autores, Wu, (2002) concluye que el comportamiento después del pico de carga depende directamente de la forma y la fracción volumétrica adicionada de fibra.

Por otro lado, Kobayashi y Cho, (1981) estudiaron el comportamiento del concreto reforzado con fibras de polietileno encontrando al igual que otros autores mencionados a lo largo del documento que las fibras ayudan a mejorar significativamente la tenacidad de la matriz y esto se demuestra ya que puede sostener la carga útil después de la fisuración. En dicho estudio se encontró además que el comportamiento después de la carga pico se ve directamente influenciado por la velocidad de carga del equipo, explicando que esto se debe a las características viscoelásticas de la fibra. A mayor velocidad, mayor rigidez y mayores valores de carga post-pico.

En la figura 2-9 se muestran curvas carga-deflexión para diferentes adiciones volumétricas ( $V_f$ ) de fibras de polietileno del estudio realizado por Kobayashi y Cho, (2002) con picos de carga mayores al obtenido en el agrietamiento donde se puede observar claramente el comportamiento “*hardening*” a flexión.

**Figura 2-9:** Curvas típicas de carga-deflexión para concreto reforzado con fibras de polietileno con varios contenidos de fibra (velocidad del cabezal:20mm/min).

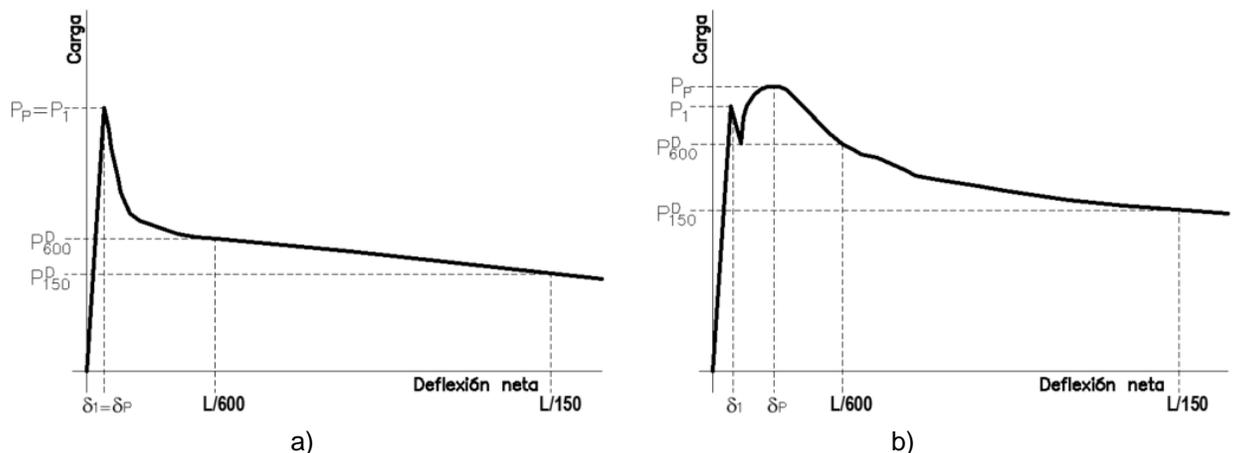


Nota. Tomado de *Flexural Behavior of Polyethylene Fibre reinforced Concrete*, por Kobayashi y Cho, (1981), p.22.

Existen varios métodos de ensayo estandarizados para medir la tenacidad, resistencias residuales y entre otras propiedades del FRC entre los más comunes. Están las metodologías de ensayo ASTM C1609, ASTM C1399, ASTM 1550, JSCE SF-4 RILEM TC162-TDF, UNE-EN 14651, JCI-SF4. La mayoría de las normas coinciden en el ensayo de flexión con carga en el centro (tres puntos de apoyo) o con carga aplicada a tercios de los apoyos (cuatro puntos de apoyo) de un elemento prismático. No obstante, se debe aclarar que los resultados obtenidos por los diferentes métodos de ensayos no son comparables entre sí (Peagle et al. 2015).

El método de ensayo para medir el comportamiento a flexión de concretos reforzados con fibras y en específico para medir la tenacidad de estos del ASTM C1609 propone que los esfuerzos residuales sean obtenidos a partir de la gráfica experimental de carga-deflexión, donde el esfuerzo pico ( $f_1$ ) es una medida que caracteriza el comportamiento del material hasta el inicio de la fisuración, en la Figura 2-10, se puede observar que el estándar tiene en cuenta además los dos tipos de comportamientos de este tipo de materiales descritos previamente, *strain softening* y *strain hardening*, donde para el primero de los casos la carga máxima ( $P_P$ ) es igual al valor de la carga para el primer punto donde la pendiente de la curva experimental carga-deflexión es igual a cero ( $P_1$ ).

**Figura 2-10:** Parámetros para análisis de gráficas según ASTM C1609 a) Carga máxima igual a primer pico de carga y b) Carga máxima mayor a primer pico de carga.



Nota. Adaptado de *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*, (2019), p.6-7.

Los puntos de cargas adicionales indicados como ( $P_{600}^D$  y  $P_{150}^D$ ) asociados a las deflexiones especificadas ( $L/600$  y  $L/150$ ), son parámetros comparativos que caracterizan la capacidad residual después del agrietamiento y son utilizados para medir el desempeño a flexión.

Es importante resaltar que el ASTM en su estándar C1609 (comité C09 y subcomité C09.42) reitera en la Nota 1 que: “La resistencia residual calculada no es realmente un esfuerzo, sino un esfuerzo obtenido de la teoría de flexión para materiales elásticos lineales teniendo en cuenta una sección no fisurada”.

Este también aclara en su Nota 2 que la magnitud de la tenacidad obtenida para el área bajo la curva ( $T_{150}^D$ ) indica la capacidad de absorción de energía para las dimensiones exactas y la configuración de carga del espécimen. Por lo tanto, todos los cálculos se deben realizar a partir del promedio de las dimensiones de base y altura medidas particularmente para cada probeta.

Adicional a lo anterior y al igual como Carnovale, (2013) expresa “la tenacidad ( $T_{150}^D$ ) para una deflexión igual a  $L/150$  debe ser calculada considerando el área bajo la curva desde la deflexión  $\delta=0$  hasta  $\delta=L/150$ . Usando la regla del trapecio se puede expresar de la siguiente forma” (p.94):

$$T_{150}^D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\delta_{i+1} - \delta_i)(P_{i+1} - P_i) \quad \text{Ec. 2-4}$$

## 2.4. Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Bajo Cargas Cíclicas

Elementos estructurales tales como las losas de pavimentos están constantemente bajo cargas repetitivas las cuales deterioran la capacidad de carga del elemento y, por lo tanto, su durabilidad. Los siguientes autores investigaron el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras.

Arivalagan, S., (2012) comparó el comportamiento a flexión de vigas de concreto de hormigón simple con y sin refuerzo convencional más la adición de una misma cantidad volumétrica de fibras ( $V_f=0.35\%$ ) bajo ciclos de carga y descarga que variaban e incrementaban constantemente su amplitud desde un 10% hasta un 70% de la capacidad de carga de la viga aproximadamente. Los resultados mostraron que las vigas reforzadas

adicionalmente con fibras mejoraron 2.45 veces su capacidad de absorción de energía (tenacidad) medida del área bajo la curva para cada ciclo de carga en comparación con las vigas reforzadas solo con su refuerzo tradicional. Por otro lado, se encontró que la adición de fibras aumentó la resistencia a cortante y esto se evidenció debido a que los patrones de falla de las vigas con adición de fibras y sin estas fueron a flexión y cortante respectivamente.

Asimismo, Boulekbache et al., (2016) estudiaron el comportamiento a flexión de concreto reforzado con diferentes dosificaciones de fibras de acero, diferentes resistencias de la matriz y diferentes relaciones de aspecto bajo cargas cíclicas en vigas prismáticas de 150x150x700 controlando el desplazamiento de la carga y descarga hasta la falla. En esta investigación se encontró que la resistencia a la flexión y la ductilidad mejora significativamente con la cantidad adicionada, la orientación de las fibras y la resistencia de la matriz, donde el esfuerzo a la flexión se incrementó en casi 242%. Adicionalmente encontraron que las curvas de carga y descarga para todos los especímenes ensayados no son paralelos a la curva de carga inicial lo que significa que hay una degradación de la rigidez del elemento para cada histéresis de carga, por lo tanto, midieron la evolución del daño del material calculando el módulo cíclico y de la relación  $E_{cyc}/E_0$  encontrando que tanto en la fase previa como en la posterior al pico hay una disminución menos acelerada con el aumento de volumen de fibras.

Por otro lado, Ghosni et al., (2014) investigaron principalmente como se mejoró la ductilidad y el amortiguamiento de vigas reforzadas tradicionalmente con la adición de fibras sintéticas con el fin de reducir la cuantía de acero de refuerzo convencional.

## **2.5. Diseño de Concreto Reforzado con Fibras Normatividad Vigente**

### **2.5.1. Códigos y Normas Internacionales**

Actualmente organizaciones Internacionales como ACI, ASTM, RILEM, FIB, JCI, JSCE, entre otras, se han concentrado en la investigación de los materiales de construcción (concretos reforzados con fibras) y en el desarrollo de normas de diseño y recomendaciones para la ejecución de ensayos con los que se pueda caracterizar

mecánicamente los materiales a tensión/compresión y ensayos para conocer el comportamiento en los estados límite de resistencia a cortante, flexión, fatiga, entre otros.

De los resultados de la caracterización de los materiales y de las gráficas obtenidas de los ensayos a flexión, los códigos han propuesto modelos constitutivos simples (bilineal, trilineal y algunos más complejos multilineal) (Pujadas, 2013) basados en el comportamiento de ablandamiento (softening) o endurecimiento (hardening) del concreto reforzado con fibras con el fin de presentar un modelo con el cual se pueda realizar un diseño plástico de los elementos.,

Adicionalmente, el (fib, 2010) introduce el uso del parámetro adimensional de orientación (K) el cual se puede tomar como la unidad (1) para distribuciones isotrópicas y mayor o menor que la unidad cuando se pueda demostrar experimentalmente que la orientación de estas pueda influir en su comportamiento (Pujadas, 2013).

### 2.5.2. Códigos y Normas Nacionales

A nivel nacional es muy limitado el alcance normativo para los materiales compuestos. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente considera el uso de fibras de acero únicamente en el diseño de elementos como complemento al refuerzo tradicional, en el capítulo C.2.2 de este, se define como: “**Concreto reforzado con fibras de acero** (Steel fiberreinforced concrete) — Concreto que contiene fibras de acero dispersas, orientadas aleatoriamente”. (NSR-10, 2010, P. C-29); sin embargo, en capítulos posteriores se puntualiza que estas fibras deben ser de acero corrugado C.3.5.8 y el comentario de la norma para este mismo apartado CR3.5.8 indica que no se recomienda su uso cuando en el diseño del elemento se ha utilizado acero inoxidable o galvanizado.

Para el refuerzo a cortante la normativa nacional expone tres condiciones para considerarlo aceptable, primero, que la cuantía volumétrica sea como mínimo  $60\text{kg/m}^3$ , segundo, que la resistencia residual obtenida del ensayo realizado según ASTM 1609 sea al menos 90% la resistencia del primer pico y por último que la resistencia residual al llegar al  $1/150$  de la luz sea mayor o igual al 75% de la resistencia del primer pico. Por otro lado, deja abierta la discusión al no existir suficientes estudios o datos sobre la influencia en el comportamiento mecánico de los elementos cuando han estado bajo condiciones de alta corrosión por estar expuestos a cloruros provenientes de la sal, el agua salada, el agua de mar, entre otros (NSR-10, 2010).

---

En cuanto al uso de fibras de otros tipos de materiales en el capítulo F.4.7.5 “*Diseño del Tablero y Concreto como una Unidad Compuesta*” se hace una pequeña mención al uso de fibras de otros materiales, para el refuerzo por retracción y temperatura:

Alternativamente, pueden utilizarse fibras de acero en lugar de la malla de refuerzo para efectos de retracción y temperatura de acuerdo con las especificaciones NTC 5214 (ASTM A820), en una cuantía mínima de  $14.8 \text{ kg/m}^3$ , o fibras macro sintéticas, hechas a partir de poliolefino virgen, con un diámetro equivalente entre 0.4mm y 1.25 mm con una relación de aspecto mínima (longitud/diámetro equivalente) de 50, en una cuantía mínima de  $2.4 \text{ kg/m}^3$  (NSR-10, 2010. P. F-405).

La norma permite el reemplazo de la malla electrosoldada para el caso específico de losas de entepiso sobres tableros metálicos por fibras de acero e introduce por primera vez el uso de fibras de otro material (la poliolefina es un polímero termoplástico entre los que se encuentran el polietileno, el polipropileno y entre otros polímeros) y da una cuantía mínima para su uso, no obstante, como se puede apreciar aún es limitado su alcance.



## Capítulo 3. Propiedades de Las Fibras – Programa Experimental Parte I

La primera parte que se desarrolló del programa experimental fue la caracterización de las principales propiedades geométricas de las fibras y del esfuerzo a la tensión propiedad de mayor interés para el estudio del concreto reforzado con fibras (FRC). Las fibras seleccionadas para la investigación son mostradas en la fotografía 3-1 y su hoja de datos es anexada en el capítulo A.4. A nivel geométrico las fibras fueron analizadas por métodos de medición manual y por análisis de procesamiento de imágenes con el fin de obtener la longitud real ( $l_f$ ) y su diámetro equivalente ( $d_e$ ) para finalmente determinar su relación de aspecto ( $\lambda$ ). A nivel mecánico fueron ensayadas según el método indicado en el estándar ASTM C1557 “Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus of Fiber”, para su condición normal en estado ambiente y para concentraciones que simulan el ambiente de un concreto tradicional con cemento portland denominada como 0% y tres concretos con adición de humo de sílice entre 5 y 15%. Para el estudio se emplearon macrofibras sintéticas de uso regular a nivel nacional <sup>1</sup> (mezcla entre polipropileno y polietileno blend) como se muestra en la siguiente fotografía.

**Fotografía 3-1:** MacroFibras sintéticas estructurales.



---

<sup>1</sup> Fibras marca TOXEMENT referencia TUF-STRAND SF. (Ver anexo A.4)

Las principales características que indica el proveedor se resumen en la tabla 3-1:

**Tabla 3-1:** Características principales de fibras (Según proveedor).

Parámetro	Valor
Material	Polipropileno (PP) / Polietileno (PE)
Longitud (mm)	50
Relación de aspecto ( $l_f/d_e$ )	74
Esfuerzo a la tensión (MPa)	600 – 650 MPa
Densidad específica	0.92g/cm <sup>3</sup>

### 3.1. Caracterización Geométrica de las Fibras

Como se ha descrito previamente, las características geométricas de las fibras tales como longitud, forma, diámetro, relación de aspecto ( $\lambda$ ), entre otras, influyen directamente en el comportamiento mecánico de la matriz de concreto. Resultados experimentales han mostrado que la sección transversal de las fibras (circular, rectangular, irregular, triangular, hueco, etc.) contribuye en la adhesión de las fibras a la matriz (ACI Committee 544.1R, 2009) y por lo tanto, directamente en su desempeño a la flexión (Behdoudj et al., 2013; Pakravan et al., 2016).

Según lo anterior y dada la gran variedad tanto de secciones transversales, como diferencias en las longitudes se han desarrollado diferentes especificaciones (ASTM A820/A820M, 2011; BS-EN-14889-2, 2006; Figueiredo, 2008) con el propósito de caracterizar geoméricamente las fibras, clasificarlas y validar rangos dimensionales y tolerancias permitidas con el fin de comparar los valores reportados por los fabricantes con los obtenidos experimentalmente. El presente trabajo se apoyó del estándar europeo (BS-EN-14889-2, 2006) que trata en específico fibras poliméricas para el concreto.

Para realizar la caracterización geométrica de las fibras de la investigación y obtener una relación de aspecto equivalente ( $l_f/d_e$ ) se obtuvo el promedio de la longitud medida con un calibrador de  $\pm 0.01$ mm de precisión de un grupo de fibras seleccionadas al azar y el promedio del diámetro equivalente medido digitalmente en imágenes de alta resolución y/o el obtenido a partir de la relación entre la masa y la longitud de la fibra calculada previamente según como propuso (Cáceres et al., 2015).

### 3.1.1. Medición Manual

Siguiendo las pautas del Estándar (BS-EN-14889-2, 2006) “Fibres for Concrete – Part 2”, se tomaron cinco (5) medidas de longitud para diez (10) fibras seleccionadas aleatoriamente y sujetadas por medio de un cubreobjetos (Fotografía 3-2) con un calibrador digital de hasta  $\pm 0.01\text{mm}$  precisión, se calculó el promedio de la longitud ( $\bar{l}_f$ ), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV) por fibra y el total para el grupo resumidos en la Tabla 3-2.

**Fotografía 3-2:** Medición de longitud de fibras con calibrador digital.



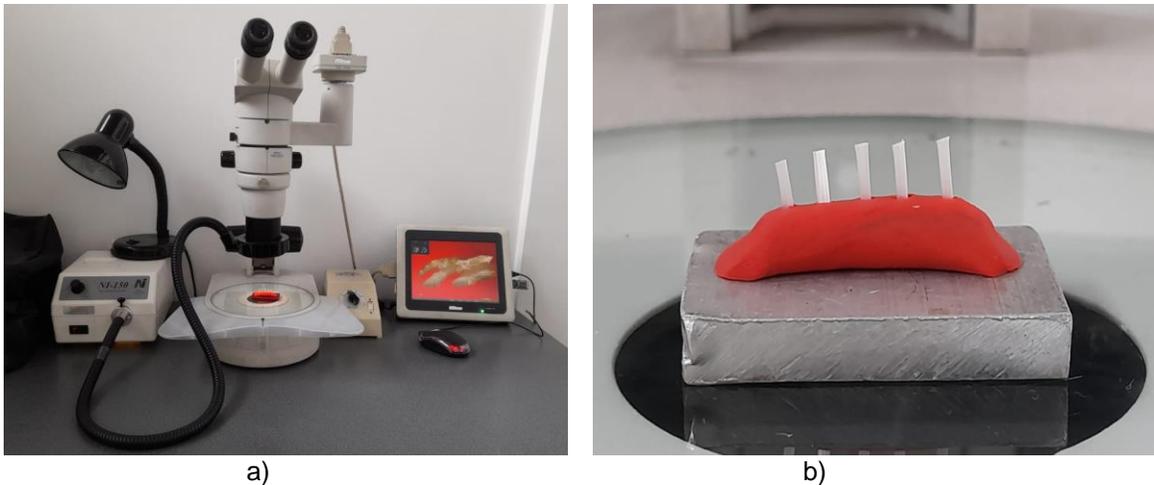
**Tabla 3-2:** Medición de longitud de fibras por método manual.

Muestra	Longitud equivalente (mm)						S	CV (%)
	$l_{f1}$	$l_{f2}$	$l_{f3}$	$l_{f4}$	$l_{f5}$	$\bar{l}_f$		
F-1	56.47	56.46	56.33	56.44	56.87	56.51	0.18	0.33
F-2	51.13	50.85	50.93	50.80	50.76	50.89	0.13	0.26
F-3	52.79	53.18	53.37	53.43	53.44	53.24	0.24	0.46
F-4	53.34	53.82	54.14	53.69	53.99	53.80	0.27	0.51
F-5	51.43	51.09	51.49	51.37	51.42	51.36	0.14	0.27
F-6	53.68	53.49	53.77	53.9	53.59	53.69	0.14	0.26
F-7	54.06	53.5	53.43	53.55	53.85	53.68	0.24	0.44
F-8	55.95	55.25	56.01	55.83	55.43	55.69	0.30	0.54
F-9	56.55	56.49	56.52	56.86	56.27	56.54	0.19	0.33
F-10	54.30	53.96	54.32	54.01	54.82	54.28	0.31	0.56
						$\bar{l}_f$	53.97	
						S	1.82	
						CV(%)	3.37	

### 3.1.2. Imagen Digital

Se tomaron imágenes de alta resolución con una magnificación de 5X por medio de un estereomicroscopio de marca Nikon SMZ800 (ver Fotografía 3-3 a)) de secciones aleatorias de un grupo de fibras con el fin de caracterizar su forma, medir su diámetro equivalente y su área. Todas las capturas fueron analizadas con el software de procesamiento de imágenes ImageJ versión 1.53k y las medidas tomadas con sus herramientas de medición. Para realizar las capturas de las secciones transversales se usó la rigidez del material con el propósito de incrustar las fibras a una porción de plastilina (Bunsell, 2018) por lo general se recomienda una resina, sin embargo, usando plastilina se ajustó bien cómo se puede observar en la Fotografía 3-3 b).

**Fotografía 3-3:** a) Estereomicroscopio marca NIKON SMZ800 UN, sede Bogotá – Laboratorio Inter facultades de Ensayos Mecánicos y b) Método de sujeción de fibras.

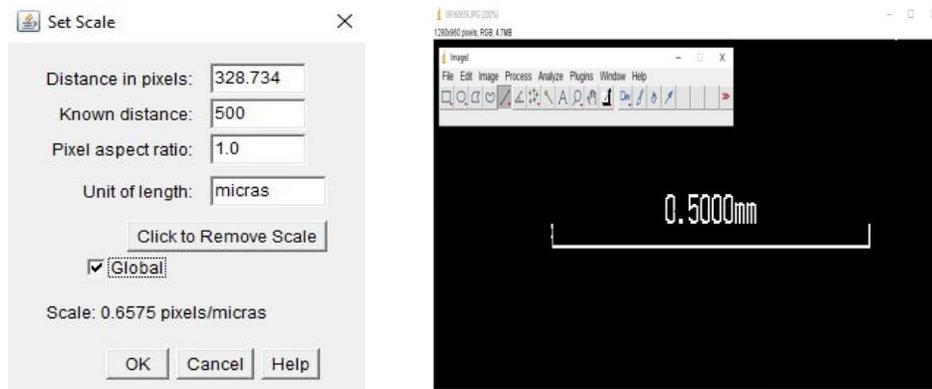


Cuando se tienen microfotografías digitales es indispensable calibrar la escala de la imagen antes de realizar las medidas. Esto se realizó tomando una escala de referencia capturada con el mismo microscopio, con la misma configuración óptica, resolución y el mismo tamaño de la imagen. Para evitar sesgos en la toma de medidas se recomienda que para la calibración de la escala de las imágenes se realice varias veces el procedimiento (para el análisis de la investigación se realizaron 15 capturas) con el fin de obtener un promedio de distancia entre píxeles. La tabla 3-3 es un resumen los valores en píxeles de las capturas y el promedio para calibración finalmente de la escala. Con el fin de simplificar el procesamiento de datos, todas las imágenes para la investigación se capturaron con la misma referencia XGA equivalente a una resolución 1024x768 píxeles.

**Tabla 3-3:** Calibración de escala en programa de procesamiento de imágenes ImageJ.

Captura	Calibración de escala (píxeles)						
	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	S
A	328.00	329.00	328.33	328.34	329.33		
B	329.00	329.00	328.67	328.33	328.34	328.734	0.38
C	329.00	329.00	329.00	329.00	328.67		

**Figura 3-1:** a) Ajuste de escala en programa de procesamiento de imágenes ImageJ y b) Escala de referencia.

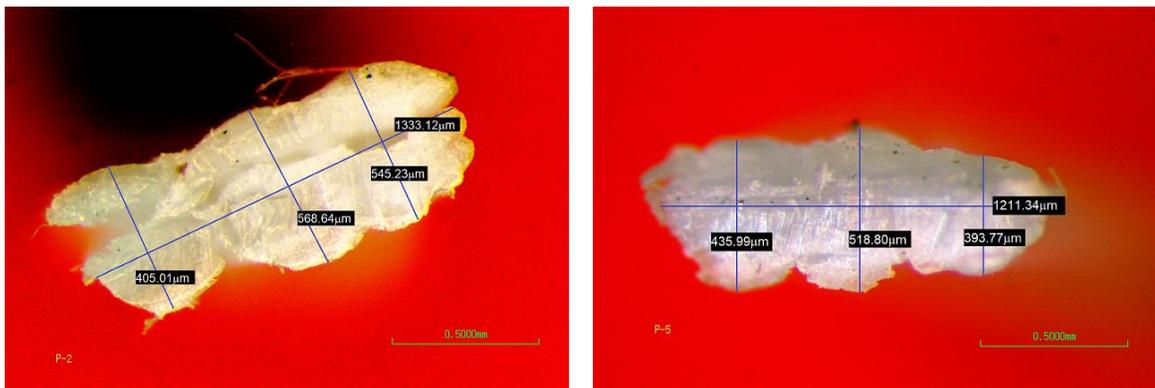


a)

b)

Para determinar el diámetro equivalente por medio del método de análisis de imágenes digitales se tomaron suficientes registros de ancho ( $w_f$ ) y espesor ( $t_f$ ) sobre la misma sección transversal de la fibra para obtener un valor promedio de estas dimensiones, como se indica en la Fotografía 3-4.

**Fotografía 3-4:** Medida de ancho promedio y espesores relativos de sección transversal fibras a) P-2 y b) P-5.



a)

b)

El diámetro equivalente se calculó con la ecuación planteada para fibras rectangulares por el estándar europeo EN14889-2 (Ver ecuación Ec. 3-1):

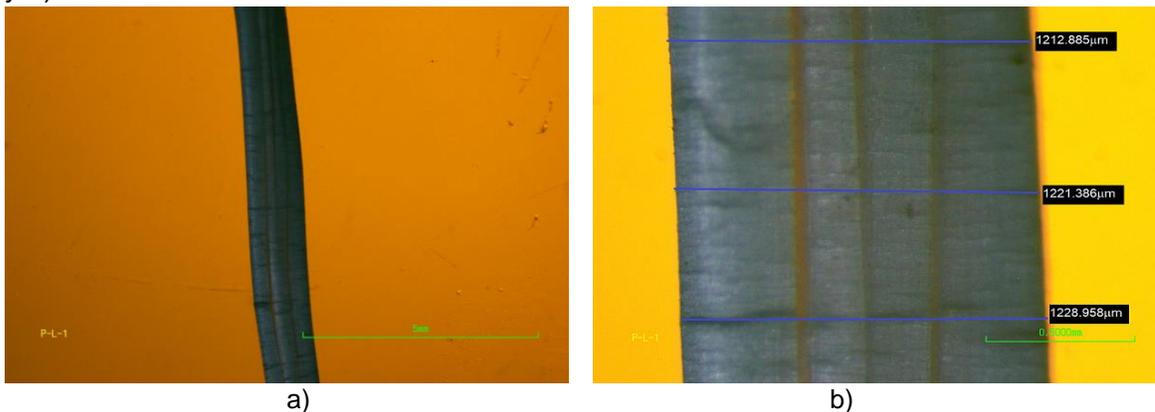
$$d_e = \sqrt{\frac{4 \cdot w_f \cdot t_f}{\pi}} \quad \text{Ec. 3-1}$$

**Tabla 3-4:** Medidas por medios digitales de ancho y espesor de fibra - Cálculo de diámetro equivalente para sección rectangular.

Muestra	Ancho de fibra ( $\mu\text{m}$ )		Espesor de fibra ( $\mu\text{m}$ )		Diámetro eq. ( $\mu\text{m}$ ) $d_e$	Área eq. ( $\text{mm}^2$ ) $A_f$	FIER
	$\bar{w}_f$	$S(w_f)$	$\bar{t}_f$	$S(t_f)$			
<b>P-1</b>	1208.50	90.39	494.64	113.68	872.41	0.60	1.24
<b>P-2</b>	1333.12	85.11	506.29	70.69	927.02	0.67	1.26
<b>P-3</b>	1251.20	97.50	413.87	56.25	811.99	0.52	1.31
<b>P-4</b>	1260.22	181.33	460.18	84.11	859.29	0.58	1.27
<b>P-5</b>	1211.34	155.17	449.52	71.03	832.65	0.54	1.27
				<b>Promedio</b>	860.67	0.58	
				<b>S</b>	43.87	0.05	
				<b>CV (%)</b>	5.10	9.21	

El ancho de la fibra es variable a lo largo de su longitud tal como se muestra en la Fotografía 3-5, en consecuencia, el diámetro equivalente calculado en la tabla 3-4 por el análisis de imágenes digitales corresponde a la distancia promedio de la proyección de la sección transversal de la fibra cortada en un solo plano.

**Fotografía 3-5:** Variación del ancho  $w_f$  a lo largo de la longitud de la fibra. a) Escala 5mm y b) Escala 0.5mm.



### 3.1.3. Método Indirecto

Para determinar el diámetro equivalente de las fibras adicionalmente se empleó el método indirecto de la densidad, en el cual el diámetro es una función de la masa ( $m_f$ ), la longitud de la fibra ( $l_f$ ) y la densidad del material, este fue calculado con la siguiente expresión del estándar europeo (EN-14889-2, 2006) (Ver ecuación Ec. 3-2):

$$d_e = \sqrt{\frac{4 \cdot m_f \cdot 10^6}{\pi \cdot l_f \cdot \rho}} \quad \text{Ec. 3-2}$$

La densidad que se usó para determinar el diámetro equivalente fue la suministrada por el proveedor de la fibra reportada en la tabla 3-1 o en el anexo A-4 igual a  $\rho=0.92\text{g/cm}^3$  y la longitud de la fibra ( $l_f$ ) fue la calculada por la medición manual consignada en la tabla 3-2. Con el fin de calcular el diámetro equivalente por medio de la ecuación Ec. 3-2, las fibras fueron pesadas individualmente en una balanza analítica con una precisión de  $\pm 0.001\text{g}$  marca SHIMADZU modelo UW620H (ver fotografía 3-6).

**Fotografía 3-6:** Registros individuales de peso de fibras.



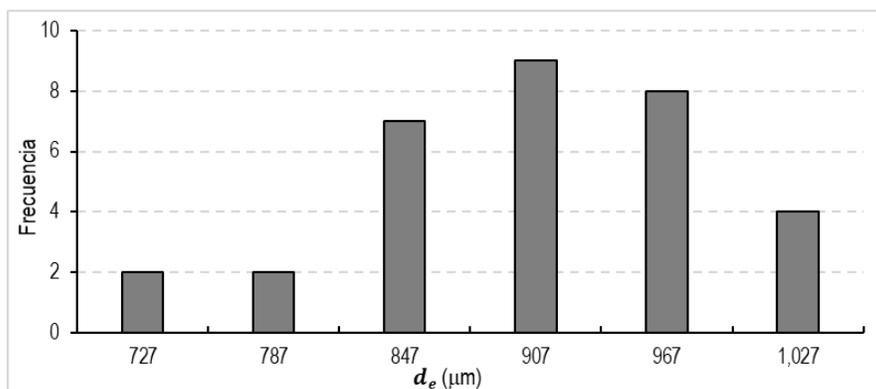
En la tabla 3-5 se muestra el resumen de los valores calculados de diámetro equivalente ( $d_e$ ) obtenidos a partir de cada uno de los datos de longitud ( $l_f$ ) tomados para diez fibras escogidas aleatoriamente (F-1 a F-10, Tabla 3-2) y su masa ( $m_f$ ) correspondiente. El promedio de estos  $\overline{d_e}$ , la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV).

**Tabla 3-5:** Cálculo de diámetro equivalente para sección irregular.

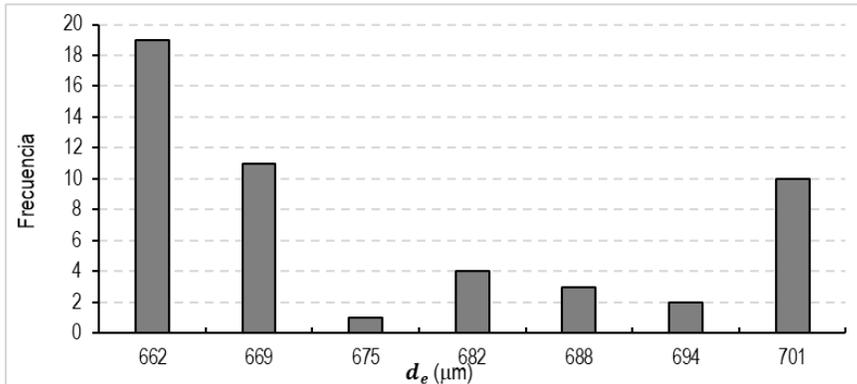
Muestra	$\bar{m}_f$ (g)	Diámetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )					$\bar{d}_e$	S	CV (%)
		$d_{e1}$	$d_{e2}$	$d_{e3}$	$d_{e4}$	$d_{e5}$			
F-1	0.02	700.11	700.17	700.98	700.30	697.65	699.84	1.14	0.16
F-2	0.016	658.09	659.90	659.38	660.22	660.48	659.61	0.85	0.13
F-3	0.017	667.59	665.14	663.95	663.58	663.52	664.76	1.53	0.23
F-4	0.017	664.14	661.17	659.21	661.97	660.13	661.32	1.69	0.26
F-5	0.016	656.16	658.34	655.78	656.55	656.23	656.61	0.90	0.14
F-6	0.017	662.03	663.21	661.48	660.68	662.59	662.00	0.87	0.13
F-7	0.017	659.70	663.15	663.58	662.84	660.99	662.05	1.47	0.22
F-8	0.019	685.55	689.88	685.18	686.28	688.76	687.13	1.86	0.27
F-9	0.02	699.62	699.99	699.80	697.71	701.35	699.69	1.17	0.17
F-10	0.018	677.33	679.46	677.20	679.14	674.11	677.45	1.91	0.28
							$\bar{d}_e$	673.05	
							S	15.95	
							CV(%)	2.37	

### 3.1.4. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos en las secciones previas se puede concluir que se encuentran grandes diferencias entre los métodos para determinar el diámetro equivalente de la fibra ( $d_e$ ). La Gráfica 3-1 muestra el histograma de frecuencias cuando este es calculado a partir de las medidas obtenidas desde imágenes digitales para secciones rectangulares (sección 3.1.2). Y en la Gráfica 3-2 se puede observar el histograma de frecuencias para el diámetro equivalente determinado desde el método indirecto (sección 3.1.3).

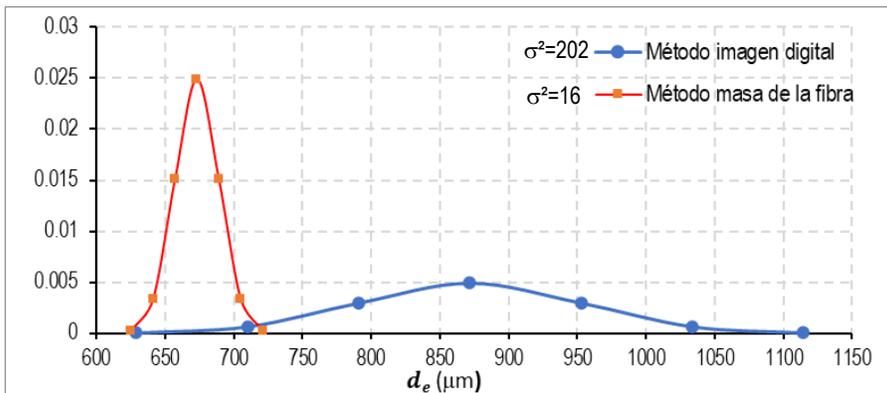
**Gráfica 3-1:** Histograma diámetro equivalente ( $d_e$ ) - Método imagen digital.

**Gráfica 3-2:** Histograma diámetro equivalente ( $d_e$ ) - Método indirecto.



El histograma para imágenes digitales muestra una distribución normalizada con una clara población, esto debido a que las muestras fueron tomadas en su mayoría de fibras similares, en comparación al histograma para el método de la masa en el que se pueden observar dos poblaciones separadas ya que fueron tomadas muestras aleatorias de fibras. Sin embargo, en la Gráfica 3-3 se puede observar como la distribución para el método indirecto tiene una forma puntuda lo que indica que los valores se encuentran más concentrados y su desviación es más pequeña que para el método de la imagen digital.

**Gráfica 3-3:** Curvas de distribución normal diámetro equivalente ( $d_e$ ) ambos métodos.



Por lo tanto, la relación de aspecto ( $\lambda$ ) para una longitud de fibra promedio ( $l_f$ ) igual a 53.97mm y un diámetro equivalente ( $d_e$ ) aproximadamente a 673.05µm, sería igual a 80.19 con una diferencia de 7.7% con respecto del valor reportado por el proveedor de la fibra de 74. Así pues, el área equivalente ( $A_f$ ) de la sección transversal es igual a 0.36mm<sup>2</sup>.

## 3.2. Propiedades Mecánicas a Tensión

### 3.2.1. Configuración y Metodología del Ensayo

Los ensayos fueron realizados en el equipo de marca SHIMADZU AUTOGRAPH (Fotografía 3-7: a)) perteneciente al Laboratorio Inter facultades de Ensayos Mecánicos de la Universidad Nacional sede Bogotá el cual contó con una celda de carga de capacidad 500N. La carga fue aplicada controlando la velocidad en 5mm/min asegurando conseguir la falla de la probeta en menos de 30s según lo indicado en el numeral 9.3 la norma ASTM C1557. Por otro lado, para evitar posibles tensiones de flexión en las fibras que indujeran a fallas prematuras (Bunsell, 2018 y ASTM C1557, 2014) se realizó una precarga a cada probeta de 1N con el fin de buscar la alineación de estas.

Para el ajuste de la metodología y protocolo de carga se realizaron una serie de pruebas preliminares de tensión sobre fibras en condición natural con diferentes formas de agarre. Primero se ensayaron las diferentes mordazas que vienen como accesorios del equipo las cuales son de control neumático para cerrado, lo que permite controlar más fácilmente la distancia entre el agarre con capacidades de 50kN, 20kN y 5kN, pero debido a las reducidas dimensiones de las probetas, la mordaza de 5kN fue la que mejor se ajustó a la geometría de estas. Por último, para evitar lecturas equivocadas debida al deslizamiento, se buscó proveer una superficie rugosa de contacto adicional aumentando la fricción entre la mordaza y la fibra, evaluando el agarre con lijas de diferente espesor (de grano medio a extrafino desde 60 a 1500 granos) seleccionando finalmente una lija extrafina de 1000 granos. Por último, se ajustó la distancia entre mordazas en 25mm para todos los ensayos.

**Fotografía 3-7:** a) Equipo SHIMADZU-AUTOGRAPH y b) Mordaza 5kN.



a)



b)

### 3.2.2. Fibras en Concentraciones Alcalinas

Para simular la alcalinidad del concreto se tuvo en cuenta la composición de la solución de poros del concreto, en la cual se consideraron cuatro (4) concentraciones de iones alcalinos de sodio y potasio (NaOH y KOH ver hoja de datos A.6 y A.5 respectivamente), simulando un concreto de referencia con solo cemento denominada como 0% y 3 concretos con adición de humo de sílice entre 5 y 15%. Las concentraciones de hidróxido de sodio y potasio se muestran en la tabla 3-6. El cálculo se realizó de acuerdo con lo planteado por (Snyder et al., 2003; Vollpracht et al., 2015).

**Tabla 3-6:** Concentraciones de iones alcalinos de sodio y potasio.

Hidróxido	Humo de Sílice			
	0%	5%	10%	15%
NaOH (g/Litro)	10.00	7.51	5.64	4.24
KOH (g/Litro)	17.39	12.42	8.87	6.33

Las cantidades de cada componente se calcularon a partir de 300ml de agua destilada los cuales se resumen en la Tabla 3.7. Por último, se sumergieron las fibras en cada una de estas condiciones durante tres meses y medio aproximadamente (110 días) para su posterior ensayo a tensión.

**Tabla 3-7:** Cantidades de iones alcalinos para 300ml de referencia.

Hidróxido	Humo de Sílice			
	0%	5%	10%	15%
NaOH (g)	3.00	2.253	1.692	1.272
KOH (g)	5.217	3.726	2.661	1.899

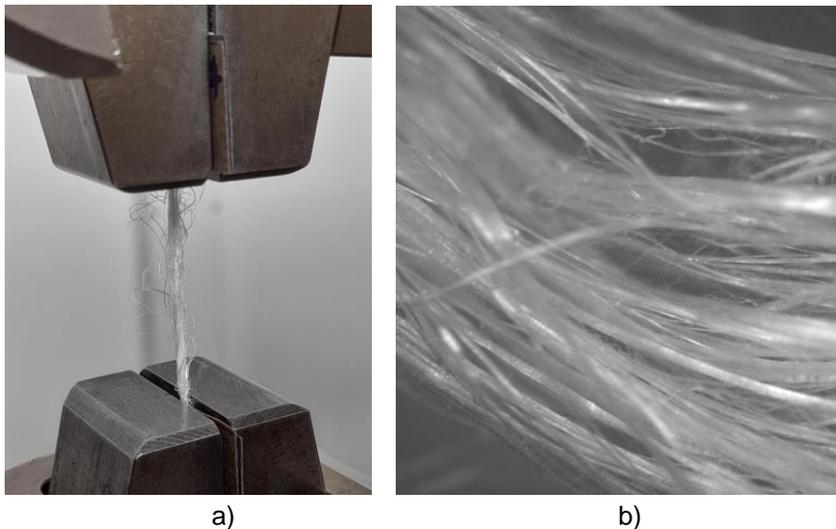
**Fotografía 3-8:** Fibras de polipropileno/polietileno en concentraciones de iones alcalinos



### 3.2.3. Análisis de Resultados

En la Fotografía 3-9 se puede observar el proceso de ruptura de la fibra durante el ensayo a tensión y una imagen ampliada tomada con un estereomicroscopio de la apariencia final (“despeinada”) de las fibras para todos los grupos después de ensayadas y falladas para su carga última aparente.

**Fotografía 3-9:** Fibra fallada a tensión a) Durante el ensayo y b) Imagen ampliada.



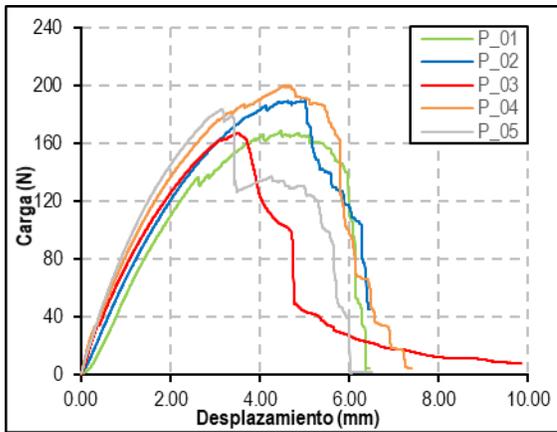
Las cargas máximas a tensión obtenidas para cada grupo de fibra designadas como Patrón (P), 0%, 5%, 10% y 15% se resumen en la Tabla 3-8, la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV), fue calculado para un total de cinco (5) fibras por grupo.

**Tabla 3-8:** Cargas máximas a tensión.

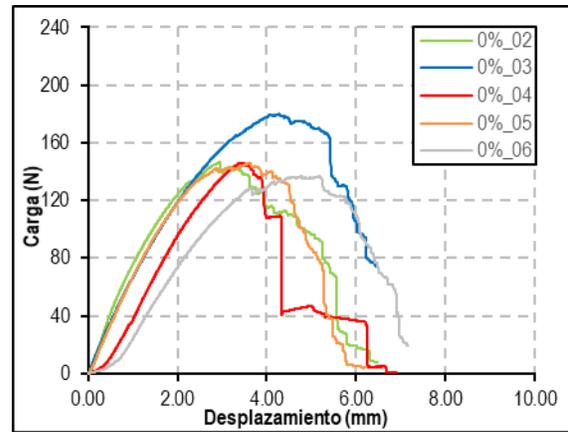
Grupo	Tensión (N)					$\bar{T}$	S	CV (%)
	_01	_02	_03	_04	_05			
<b>P</b>	168.50	189.11	166.84	199.63	183.63	181.54	12.45	6.86
<b>0%</b>	146.67	179.89	145.89	137.08	145.95	151.10	14.82	9.81
<b>5%</b>	157.52	172.77	162.70	167.41	200.98	172.28	15.22	8.83
<b>10%</b>	187.75	171.03	178.58	168.59	185.92	178.38	7.67	4.30
<b>15%</b>	201.078	191.047	165.109	180.703	198.922	187.37	13.23	7.06

Las curvas carga-desplazamiento de cada grupo de fibras se indican la Gráfica 3-4. Y en la Fotografía 3-10 se puede observar el modo de falla de cada probeta.

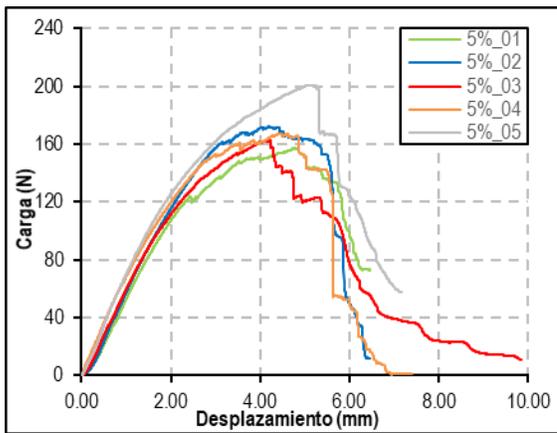
**Gráfica 3-4:** Carga-desplazamiento fibras a tensión. a) Muestra Patrón, b) Muestra 0%, c) Muestra 5%, d) Muestra 10% y e) Muestra 15%.



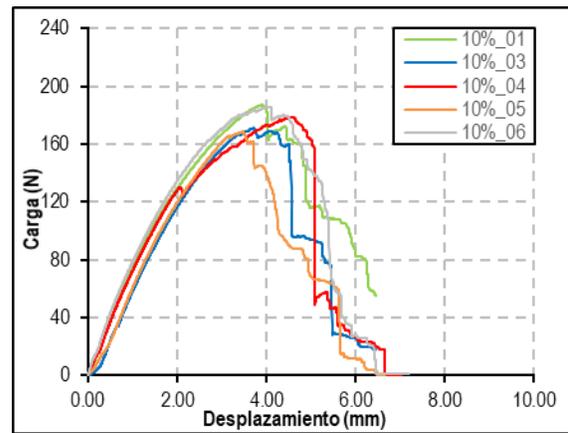
a)



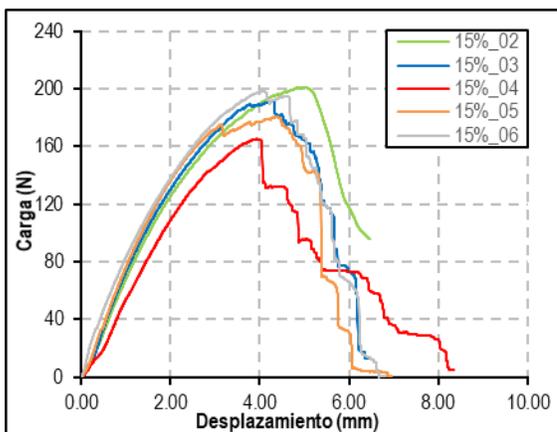
b)



c)



d)



e)

**Fotografía 3-10** Ensayo a tensión a) Muestra Patrón, b) Muestra 0%, c) Muestra 5%, d) Muestra 10% y e) Muestra 15%.



a)



b)



c)



d)



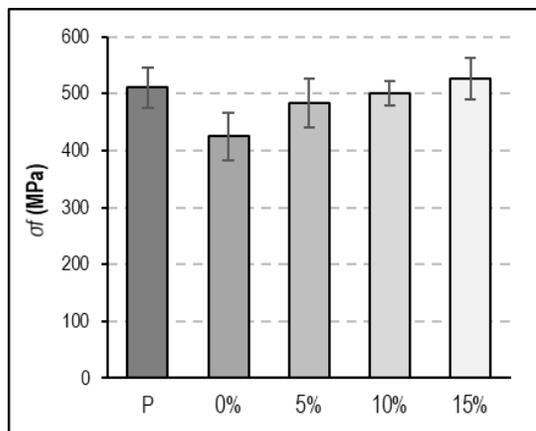
e)

**Tabla 3-9:** Esfuerzo de tensión ( $\sigma_f$ )

Grupo	Esfuerzo de Tensión (MPa)					$\overline{\sigma_f}$	S	CV (%)
	_01	_02	_03	_04	_05			
<b>P</b>	473.60	531.53	468.95	561.09	516.12	510.26	34.99	6.86
<b>0%</b>	412.25	505.62	410.06	385.29	410.23	424.69	41.67	9.81
<b>5%</b>	442.73	485.59	457.31	470.53	564.91	484.21	42.77	8.83
<b>10%</b>	527.71	480.72	501.93	473.87	522.57	501.36	21.57	4.30
<b>15%</b>	565.17	536.98	464.07	507.90	559.11	526.65	37.18	7.06

De la Tabla 3-9 y la Gráfica 3-5 se puede observar que para las fibras del grupo patrón o en estado natural se obtuvo un valor de resistencia a la tensión promedio igual a  $510.26 \pm 34.99$  MPa. Partiendo de este valor de referencia se puede concluir que las fibras del grupo del 0% que estaban en la concentración del concreto tradicional con solo cemento fueron las que más reaccionaron a la alcalinidad de la concentración, la resistencia a la tensión última se disminuyó en 16.77% con un valor promedio de la tensión igual a  $424.69 \pm 41.67$  MPa. Para los grupos del 5% y 10% se puede decir que, si bien reaccionaron a la concentración alcalina por la adición de humo de sílice no perdieron tanta capacidad en comparación a la concentración del 0%, su capacidad a tensión con respecto al grupo patrón se disminuyó de 5.11% a 1.74% respectivamente. En las fibras del grupo 15% no se disminuyó la resistencia por efecto del ambiente alcalino, estas obtuvieron un valor promedio mayor que las fibras del grupo patrón en 3.21%.

**Gráfica 3-5:** Variación del esfuerzo máximo a tensión para diferentes concentraciones alcalinas.





# Capítulo 4. Propiedades Mecánicas del Concreto Reforzado con Fibras de PP - Programa Experimental Parte II

En este capítulo, se analizó y comparó la influencia del tamaño del agregado y la adición de diferentes cantidades volumétricas de fibras en las propiedades mecánicas del material compuesto, tales como la resistencia a la compresión, coeficiente de poisson, el módulo de elasticidad, resistencia a la flexión y tenacidad. Para el análisis de resultados, las tablas y gráficas de las propiedades fueron expresadas en función del producto de la fracción volumétrica ( $V_f$ ) por la relación de aspecto de la fibra ( $\lambda$ ). Se analizó la razón con la que cambiaba la resistencia a la compresión del concreto con fibras al concreto sin fibras ( $f_c/f_{co}$ ), se observó el modo de falla de los cilindros a compresión, se calculó el coeficiente de poisson ( $\nu$ ) y la relación del módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión ( $E_c/\sqrt{f_c}$ ) obteniendo la ecuación experimental y se comparó esta con ecuaciones usadas cotidianamente en normas de diseño nacionales, internacionales y ecuaciones calculadas teóricamente por diferentes autores. En las tablas se presentan los parámetros estadísticos como el promedio de los datos ( $\overline{f'_c}$ ,  $\overline{E_c}$ ,  $\overline{\nu}$ ), desviación estándar (S) y coeficiente de variación (CV).

## 4.1. Fabricación de Probetas

### 4.1.1. Dosificación

La cantidad volumétrica de fibra fue seleccionada dentro del rango volumétrico indicado por el proveedor de la fibra  $1.8\text{kg/m}^3 - 12\text{kg/m}^3$  (los cuales son recomendados según las necesidades estructurales de los elementos). Para el desarrollo de la investigación se desarrollaron 6 mezclas, dos diferentes diseños de mezcla control sin fibra y cuatro para diferentes dosificaciones de fibra  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  y dos diferentes tamaños de agregado grueso (TMN, 12.7mm y 19mm).

La resistencia a la compresión de diseño para todas las mezclas fue de 28MPa, no obstante, se obtuvieron resistencias mayores como se puede ver en el desarrollo de este capítulo<sup>2</sup>. Por otro lado, debido a que la adición de fibras cambia el comportamiento en estado fresco del material para mejorar la trabajabilidad del concreto algunas diferencias en las mezclas se tuvieron que contemplar agregando un porcentaje de superplastificante<sup>3</sup> por peso de cemento.

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de las dosificaciones empleadas en la investigación, la caracterización de los materiales y el cálculo detallado de las mezclas se encuentra en los Anexos A y C respectivamente.

**Tabla 4-1:** Dosificación por m<sup>3</sup> para cada mezcla fabricada.

Agregado (TMN)	Item	Fibra (kg)	Grava (G) (kg)	Arena (F) (kg)	Cem. (C) (kg)	Agua (kg)	Super pl. (%)	A/C	G/F
<b>19mm</b>	M01	0.00	923.46	701.12	359.65	209.79	-	0.57	1.32
	M02	1.80	923.46	696.30	359.65	209.79	0.30	0.57	1.33
	M03	6.00	923.46	685.06	359.65	209.79	0.30	0.57	1.34
<b>12.7mm</b>	M04	0.00	748.59	827.92	400.00	247.87	-	0.62	0.90
	M05	4.50	748.59	815.57	400.00	247.87	0.28	0.62	0.92
	M06	7.50	748.59	807.34	400.00	247.87	0.55	0.62	0.93

El diseño de las mezclas se realizó por volúmenes absolutos, las cantidades de grava, cemento y agua se mantuvieron constantes para las dos clases de mezcla variando solamente la cantidad de arena y de superplastificante según la necesidad observada en el momento de mezclado partiendo de un porcentaje mínimo de 0.25% del peso del cemento hasta un 0.55% de este cuidando obtener una trabajabilidad aceptable y dentro de los rangos de proporciones establecidos por la guía para especificación, dosificación y producción de concreto reforzado con fibras ACI 544.3R, (2008) con el fin de obtener

<sup>2</sup> El Cemento utilizado en la investigación se obtuvo de la Planta de Cemento Caracolito de Cemex Colombia (ver Anexo A.3).

<sup>3</sup> Hoja de datos superplastificante MasterGlenium7975 (ver Anexo A.7).

mezclas típicas (las proporciones indicadas en la guía hacen referencia a concretos reforzados con fibras metálicas, sin embargo, la guía aclara que los mismos rangos pueden ser usados para el caso de macrofibras sintéticas con volúmenes de adición menores al 0.50% del total).

Adicionalmente se verificó que el tamaño del agregado grueso no afectara la distribución de las fibras, como se citó previamente el ACI recomienda tamaños máximos de agregados de 19mm, sin embargo, otros autores recomiendan que estos pueden ser hasta dos tercios (2/3) de la longitud máxima de la fibra, es decir, 33mm.

En la Tabla 4-2 se muestra el cálculo de la separación media entre fibras con la cual se puede verificar que las mezclas desarrolladas M02 y M03 para agregado de tamaño nominal igual a 19mm, al igual que las mezclas M05 y M06 para agregado de tamaño nominal igual a 12.7mm, cumplen el tamaño máximo del agregado planteado por el ACI 544.3R y formulado por Krenchel, H (1975) (ver ecuaciones Ec.2-1 y Ec.2-2, capítulo 2, sección 2.3.2 Mecanismo de Trabajo de las Fibras).

**Tabla 4-2:** Separación media entre fibras.

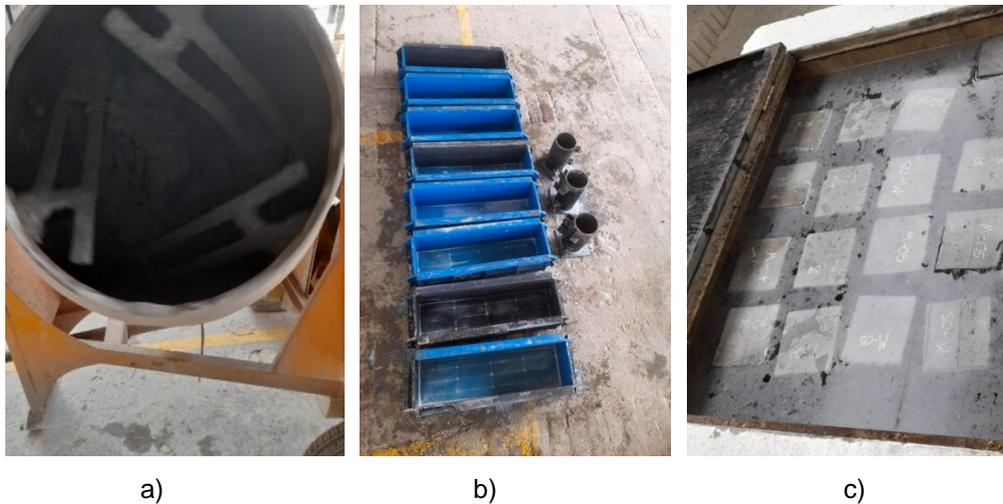
<b>Mezcla</b>	<b><math>V_f</math> (%)</b>	<b><math>n</math> (mm<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>2 Sm</math> (mm)</b>
M01	0.00%	-	-
M02	0.20%	0.0022	42.75
M03	0.65%	0.0071	23.71
M04	0.00%	-	-
M05	0.49%	0.0054	27.31
M06	0.81%	0.0089	21.24

Nota: En el siguiente capítulo (4.2. Esfuerzo a la compresión) se indica como se calculó la fracción volumétrica ( $V_f$ ).

### 4.1.2. Mezclado, Vaciado y Curado

El mezclado, vaciado y curado se llevó a cabo según las pautas establecidas en los estándares prácticos ASTM C31, ASTM C39, ASTM C192 y ASTM C1116. El procedimiento para ambos tipos de concretos: simple o reforzado con fibras, básicamente es el mismo, para el caso del concreto fibroreforzado se agregan las fibras en cualquier momento durante el proceso de mezclado incluso durante el pesado de agregados de acuerdo con la dosificación volumétrica establecida y se mezcla de 3 a 5 minutos (según recomendación del proveedor) con el fin de asegurar una correcta y uniforme distribución (Fotografía 4-1, a)). Posteriormente y para terminar la fabricación de las probetas, se verificó el asentamiento y la trabajabilidad de la mezcla según el método de ensayo ASTM C194, se realizó el vaciado en formaletas prismáticas de medidas 150x150x500 mm y en formaletas cilíndricas de medidas  $\phi 100 \times 200$  mm. El curado se realizó por inmersión total en agua con hidróxido de calcio y temperatura controlada  $23.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$  (Fotografía 4-1 b) y c) respectivamente). El número de probetas por mezcla y la cantidad de días de curado se indica en la Tabla 4-3.

**Fotografía 4-1:** a) Mezclado, b) Formaletas y c) Curado.



**Tabla 4-3:** Número de probetas por mezcla.

Probetas - Mezcla	M01	M02	M03	M04	M05	M06
Curado (días)	36	35	34	43	42	41
Prismáticas	9	9	9	8	9	8
Cilíndricas	4	4	4	3	3	3

## 4.2. Esfuerzo a la Compresión

### 4.2.1. Configuración del Ensayo

El ensayo a compresión axial fue desarrollado en el equipo Automax Smart Line del Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia que opera por medio de una bomba hidráulica controlada por un microprocesador de marca Dirimpex modelo CT-1500, la cual aplica una carga axial monotónica con un cabezal de carga de 1500 kN a una velocidad de aplicación de carga de 0.20MPa/s y una sensibilidad de 14kN hasta la ruptura de la probeta Fotografía 4-2.

Como se mencionó previamente de las pautas seguidas para la calidad del vaciado de las probetas, el ensayo se desarrolló siguiendo los protocolos del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto ASTM C39 (Norma técnica colombiana equivalente NTC 673). En total se ensayaron hasta su carga máxima 3 cilindros de un diámetro aproximado de 100mm por mezcla como se indicó en la Tabla 4-3 (Las dimensiones propias de cada espécimen se presentan en el Anexo D: Dimensiones de las probetas).

**Fotografía 4-2:** a) Equipo ensayo compresión y b) Configuración parámetros de equipo.



a)



b)

Las probetas se prepararon previamente refrentado con mortero de azufre la base superior e inferior, con el fin de obtener superficies planas y sin imperfecciones que cumplieran los requisitos de planitud y de perpendicularidad requeridos por la norma técnica ASTM C617 (norma técnica colombiana equivalente NTC 504) permitiendo una correcta distribución de esfuerzos para la fuerza aplicada sobre la sección transversal evitando de esta forma fallas de borde.

En la Tabla 4-4 se resumen las fuerzas máximas obtenidas en los cilindros a compresión ensayados para días mayores a los 28 días (para la mezcla M05 y M06 se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos para dos probetas).

**Tabla 4-4:** Fuerza máxima a compresión en cilindros a los 28 días.

Mezcla	Cilindro			Fuerza C (kN)	Área prom. A(mm <sup>2</sup> )
	_01	_02	_03		
M01	457.30	478.15	435.51	456.99	8209.78
M02	411.21	459.64	438.02	436.29	8196.94
M03	379.81	385.29	377.35	380.82	8213.53
M04	351.29	378.42	388.32	372.68	8108.38
M05	314.47	396.89	-	355.68	8280.60
M06	337.35	347.39	-	342.37	8138.74

#### 4.2.2. Análisis de Resultados

En la Tabla 4-5 se indica el promedio del esfuerzo máximo a la compresión ( $f'_c$ ) para la fracción volumétrica de fibras calculada conforme a la regla de proporción de mezclas por densidades de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_f = \frac{W_f \rho_m}{W_f \rho_m + W_m \rho_f} \quad \text{Ec. 4-1}$$

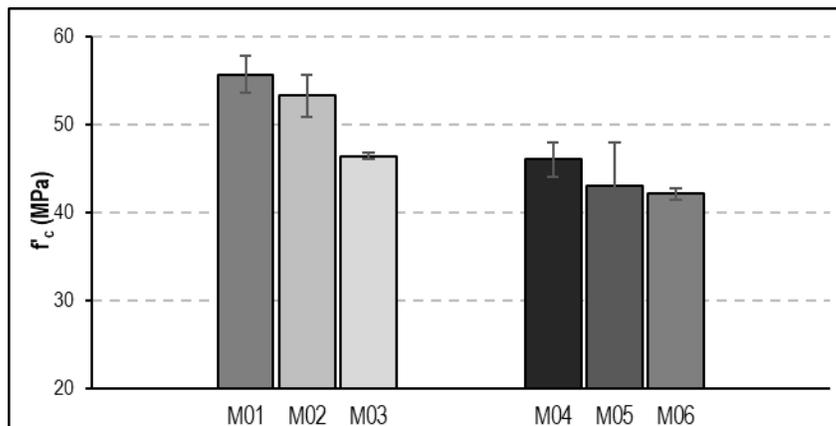
Dónde  $W_f$  corresponde al peso de la fracción de fibras,  $W_m$  peso de la matriz,  $\rho_f$  densidad de la fibra (según el proveedor de esta es igual a 917.24 kg/m<sup>3</sup>) y  $\rho_m$  densidad de la matriz (se tomó como valor de referencia 2400 kg/m<sup>3</sup> para concreto de peso normal).

**Tabla 4-5:** Resumen de esfuerzo a compresión ( $f'_c$ ) a los 28 días.

Mezcla	$V_f$ (%)	$V_f (l_f/d_e)$ (%)	$\bar{f}'_c$ (MPa)	S (MPa)	CV (%)	$f'_c/f'_{co}$
M01	0.00%	0	55.66	2.12	3.81	1.00
M02	0.20%	16	53.23	2.42	4.54	0.96
M03	0.65%	52	46.36	0.40	0.87	0.83
M04	0.00%	0	45.96	1.93	4.20	1.00
M05	0.49%	39	42.95	4.98	11.59	0.93
M06	0.81%	65	42.07	0.62	1.47	0.92

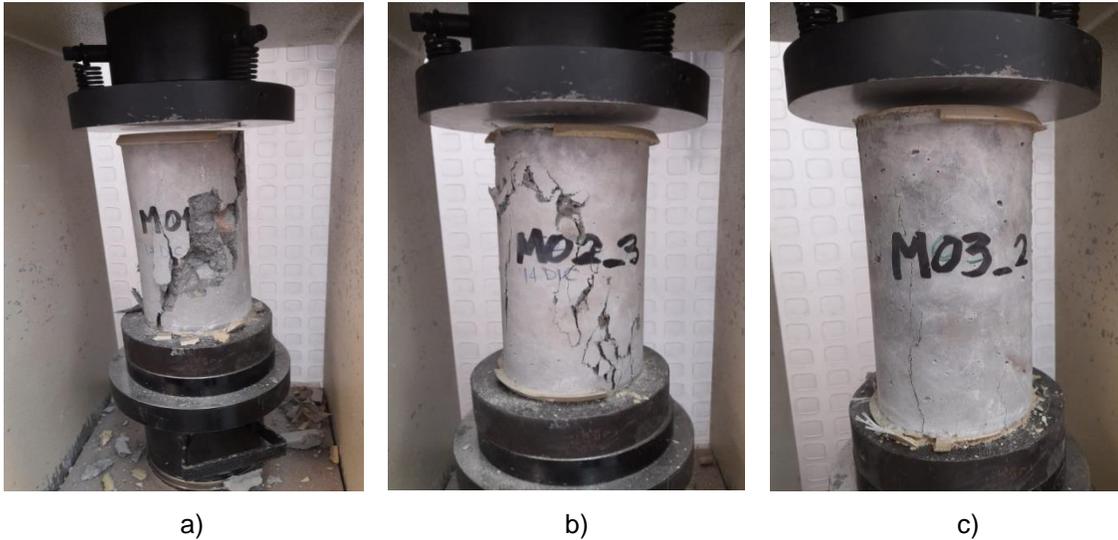
Según los resultados presentados en la Tabla 4-5 y la Gráfica 4-1, se puede concluir que el desempeño de la matriz de concreto a compresión disminuyó con la adición de fibras. Para adiciones de  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  la resistencia a la compresión se redujo en 4.37%, 16.71%, 6.55% y 8.46% respectivamente.

**Gráfica 4-1:** Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) a los 28 días.

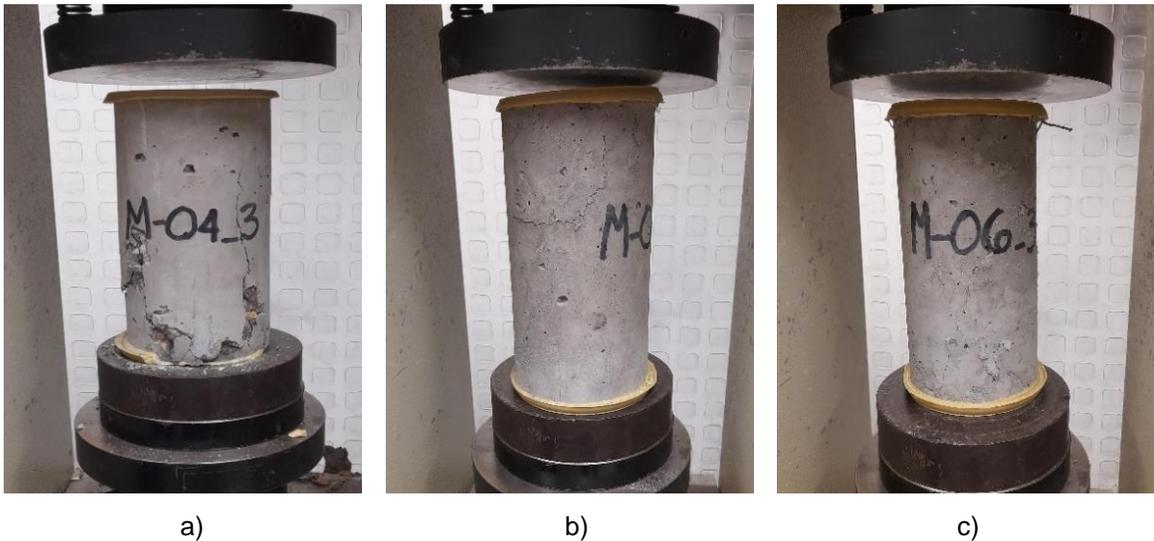


Los cilindros a compresión para las mezclas patrón sin fibras (M01 y M04) y para cantidades de adición de fibras menores o iguales a  $1.8\text{kg/m}^3$  (M02) presentaron fallas frágiles con inclinaciones de  $45^\circ$  debido a las tensiones diagonales de las fuerzas cortantes, a diferencia de los cilindros con cantidades de adición de fibras superiores a  $4.5\text{kg/m}^3$  (M03, M05 y M06, respectivamente) donde se presentaron fisuras verticales de tendencia dúctil como se puede observar de las Fotografías 4-3 y 4-4.

**Fotografía 4-3:** Mecanismo de falla en cilindros a compresión. a) M01\_0kg/m<sup>3</sup>, b) M02\_1.8kg/m<sup>3</sup> y c) M03\_6.0kg/m<sup>3</sup>.



**Fotografía 4-4:** Mecanismo de falla en cilindros a compresión. a) M04\_0kg/m<sup>3</sup>, b) M05\_4.5kg/m<sup>3</sup> y c) M06\_7.5kg/m<sup>3</sup>.



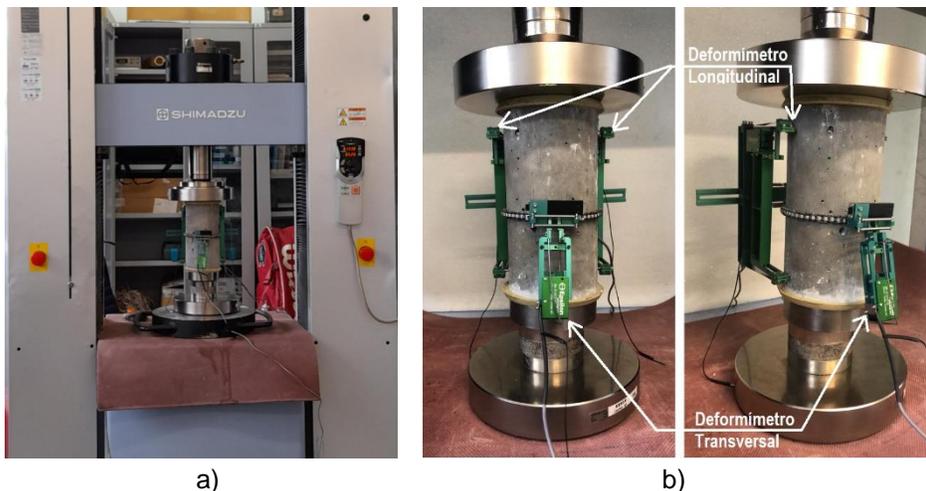
En efecto, este mecanismo de falla es ocasionado debido al confinamiento proporcionado por las fibras, donde para mayores cantidades de adición, menores relaciones de poisson fueron calculadas como se puede observar en el siguiente capítulo (ver Tabla 4-9).

## 4.3. Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson

### 4.3.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal marca Shimadzu que tiene una celda de capacidad igual 3t controlando la velocidad en 0.5mm/min según como se determina en la norma ASTM C469 (Norma técnica colombiana equivalente NTC 4025). Para el registro de las deformaciones axiales se utilizaron sensores de posición lineal (LVDT) con capacidad de medir desplazamientos verticales con una precisión de hasta una millonésima de milímetros ( $\pm 25\mu\text{m}$ ) localizados aproximadamente en la parte central de las probetas cilíndricas, los desplazamientos transversales, por otro lado, fueron medidos por medio de un sensor adicional localizado aproximadamente en el centro geométrico de la probeta Fotografía 4-5. Los datos fueron almacenados simultáneamente con la aplicación de la carga y procesados en el computador.

**Fotografía 4-5:** a) Equipo SHIMADZU y b) Configuración e instrumentación ensayo módulo de elasticidad y relación poisson.



### 4.3.2. Análisis de Resultados

Para determinar el módulo de elasticidad estático se calculó el promedio de la pendiente de una recta secante a la curva que une los puntos de esta con su correspondiente deformación en 0.00005 de la porción ascendente de la gráfica esfuerzo deformación para tres ciclos de carga y descarga llevados hasta un 40% de la carga máxima a compresión obtenida de un cilindro ensayado previamente a compresión.

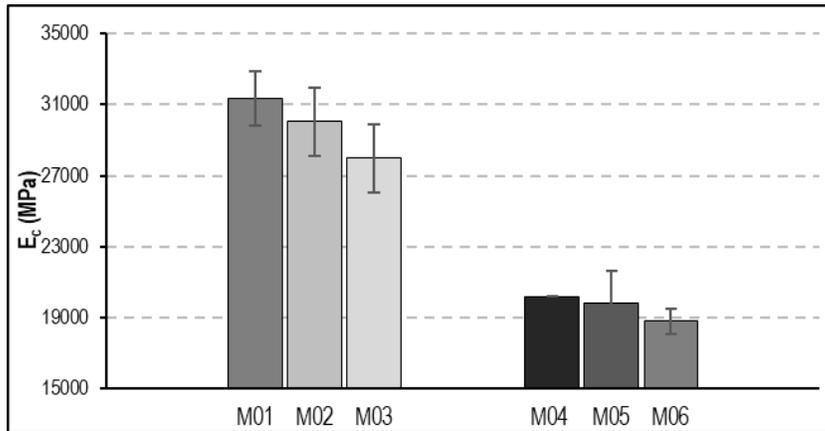
En la Tabla 4-6 se presentan los valores promedio para los esfuerzos  $\overline{S1}$  y  $\overline{S2}$  de la deformación longitudinal  $\varepsilon_2$ , el módulo de elasticidad promedio ( $\overline{E_c}$ ), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV). Para la mezcla M04 se descartó uno de los resultados obtenidos por no ser concluyente.

**Tabla 4-6:** Módulo de elasticidad estático experimental.

Mezcla	Cilindro	$\overline{S1}$ (MPa)	$\overline{S2}$ (MPa)	$\overline{\varepsilon_2}$	$E_c$ (MPa)	$\overline{E_c}$ (MPa)	CV(%)
M01	_01	2.05	19.72	0.00065	29496.54	31155.61 S=1716.84	5.51
	_02	2.38	20.18	0.00063	30449.92		
	_03	2.14	20.30	0.00059	33520.37		
M02	_01	1.88	20.35	0.00070	28508.68	30031.16 S=1892.20	6.30
	_02	1.98	20.04	0.00060	32698.24		
	_03	1.93	20.57	0.00070	28886.58		
M03	_01	2.00	20.57	0.00065	30710.23	27986.27 S=1933.92	6.91
	_02	1.79	20.31	0.00074	26836.69		
	_03	1.79	20.02	0.00074	26411.88		
M04	_01	1.29	20.44	0.00	20181.36	20181.36	0
	_02	-	-	-	-	S=0	
M05	_01	1.17	19.79	0.0009	21630.27	19814.65	9.16
	_02	1.13	20.37	0.0011	17999.02	S=1815.63	
M06	_01	1.21	20.37	0.0010	19509.17	18800.24	3.77
	_02	1.16	20.42	0.0011	18091.31	S=708.93	

Los resultados de la Tabla 4-6 y la Gráfica 4-2 muestran que el módulo de elasticidad disminuye ligeramente entre 4.2% y 10.7% para tamaños de agregado TMN de 19mm con adición de fibras de 1.8kg/m<sup>3</sup> y 6.0kg/m<sup>3</sup> (mezclas M02 y M03 respectivamente), asimismo, para tamaños de agregado TMN de 12.7mm con adición de fibras de 4.5kg/m<sup>3</sup> y 7.5kg/m<sup>3</sup> (mezclas M05 y M06 respectivamente) el módulo de elasticidad se redujo en 1.8% y 6.2%.

**Gráfica 4-2:** Módulo de elasticidad estático experimental  $E_c$



Adicional al cálculo del módulo de elasticidad, se determinó el coeficiente de poisson ( $\nu$ ) calculando la relación entre las deformaciones transversales para el promedio de los esfuerzos  $\overline{S1}$  y  $\overline{S2}$  denominados como  $\overline{e_{t1}}$  y  $\overline{e_{t2}}$  sobre el promedio de las deformaciones axiales o longitudinales producidas por el esfuerzo  $\overline{S2}$  denominado como  $\overline{\epsilon_2}$  de probetas cilíndricas a compresión cargadas dentro de un rango esfuerzos de trabajo de 0 a 40% de la resistencia última del concreto.

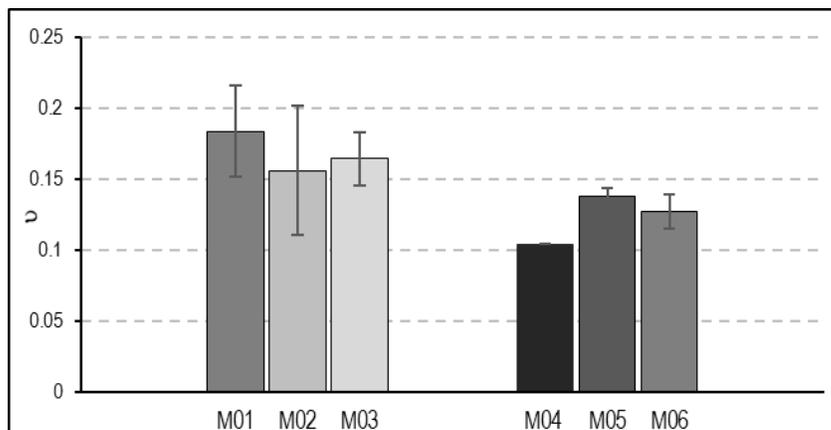
Para la mezcla M04 se descartó uno de los resultados obtenidos por no ser concluyentes. Por otro lado, los valores calculados del coeficiente de poisson según la norma ASTM C469 las mezclas M04, M05 y M06 se consideran relativamente bajos con respecto a lo mencionado en la literatura donde se indica que este coeficiente se encuentra en un rango entre 0.15 a 0.22 (Neville, 2011).

A pesar de los valores relativamente bajos obtenidos para las muestras M04, M05 y M06, en términos generales se puede concluir que el coeficiente de poisson varía significativamente para las mezclas M02 y M03 disminuyendo entre 10.6% a 15%, para las mezclas M05 y M06 en cambio, el valor aumentó entre 21.7% a 31.9%, esta diferencia entre los dos diseños de mezcla puede ser debido a que el valor del coeficiente de poisson depende de las propiedades (origen) de los agregados utilizados (Neville, 2011).

En la Tabla 4-7 y Gráfica 4-3 se presentan los valores obtenidos, la relación promedio ( $\overline{\nu}$ ), la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV).

**Tabla 4-7:** Coeficiente de poisson experimental ( $\nu$ ).

Mezcla	Cilindro	$\overline{e_{t1}}$	$\overline{e_{t2}}$	$\overline{\varepsilon_2}$	$\nu$	$\bar{\nu}$ (MPa)	CV(%)
M01	_01	5.64E-05	1.47E-04	6.49E-04	0.152	0.184 S=0.03	17.39
	_02	4.60E-05	1.47E-04	6.35E-04	0.177		
	_03	5.35E-05	1.77E-04	5.92E-04	0.238		
M02	_01	9.11E-05	2.28E-04	6.98E-04	0.211	0.157 S=0.05	29.14
	_02	5.29E-05	1.41E-04	6.02E-04	0.160		
	_03	2.48E-05	8.88E-05	6.95E-04	0.099		
M03	_01	4.36E-05	1.59E-04	6.55E-04	0.191	0.165 S=0.02	11.58
	_02	9.30E-06	1.09E-04	7.40E-04	0.145		
	_03	3.53E-05	1.45E-04	7.40E-04	0.158		
M04	_01	2.61E-06	1.02E-04	9.99E-04	0.105	0.105	0
	_02	-	-	-	-	S=0	
M05	_01	1.29E-06	1.25E-04	9.11E-04	0.144	0.138	4.06
	_02	1.08E-05	1.52E-04	1.12E-03	0.133	S=0.006	
M06	_01	1.61E-06	1.15E-04	0.0010	0.116	0.127	9.25
	_02	3.11E-06	1.51E-04	0.0011	0.139	S=0.012	

**Gráfica 4-3:** Coeficiente de poisson experimental ( $\nu$ ).

## 4.4. Resistencia a la Flexión

### 4.4.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación

En el siguiente trabajo se empleó la metodología presentada en: “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ASTM C 1609, con el fin de evaluar el comportamiento del concreto reforzado con fibras para momentos flexionantes usando los parámetros de resistencia residual, tenacidad, entre otros, obtenidos a partir de la curva carga-deflexión para la configuración de una viga simplemente apoyada.

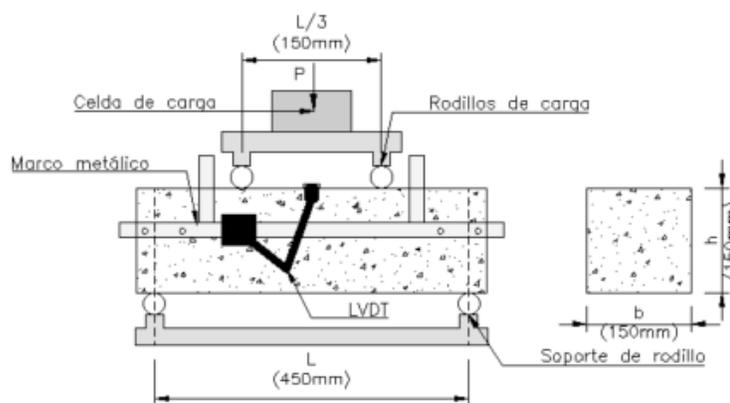
Los ensayos fueron realizados en la máquina universal maca Shimadzu AG-X plus que tiene una celda de capacidad igual a 3 ton controlando las velocidades de aplicación (según tabla 1 de la norma), la primera hasta una deflexión neta de  $L/900$  (0.5mm) a 0.1mm/min y la segunda a 0.3mm/min hasta alcanzar una deflexión neta en el tramo central de la probeta de 3mm, en este punto se finalizó la prueba. Para medir esta deflexión se instaló sobre el marco metálico (el cual tiene las especificaciones requeridas para evitar los efectos de torsión indicadas en el numeral 6.2 del estándar) un deflectómetro (LVDT) de marca Epsilon modelo 3540 (con una precisión de  $\pm 1 \times 10^{-6}$ mm) sobre uno de los lados de la probeta, el estándar señala que se debe instalar un deflectómetro a cada lado de la viga y la deflexión neta medida sea el promedio de estos dos resultados, no obstante, en la presente investigación se utilizó un deflectómetro, como se puede observar en la Fotografía 4-6.

**Fotografía 4-6:** Configuración e instrumentación ensayo módulo de rotura.



La configuración para la aplicación de la carga y la instrumentación en las probetas prismáticas (150x150x500) se indica en la Figura 4-1, la distancia entre soportes tipo rodillo ( $L$ ) es igual a 450mm y la distancia de los rodillos de aplicación de carga ( $L/3$ ) es igual a 150mm, el valor de la fricción proporcionada por estos es relativamente baja y constante con el fin de evitar un aumento de la carga, según como se especifica en la norma ASTM C1812. Además, uno de estos apoyos debe ser capaz de girar en el eje longitudinal, con el objetivo de proporcionar la misma configuración que una viga simplemente apoyada.

**Figura 4-1:** Esquema ensayo a flexión ASTM C1609.

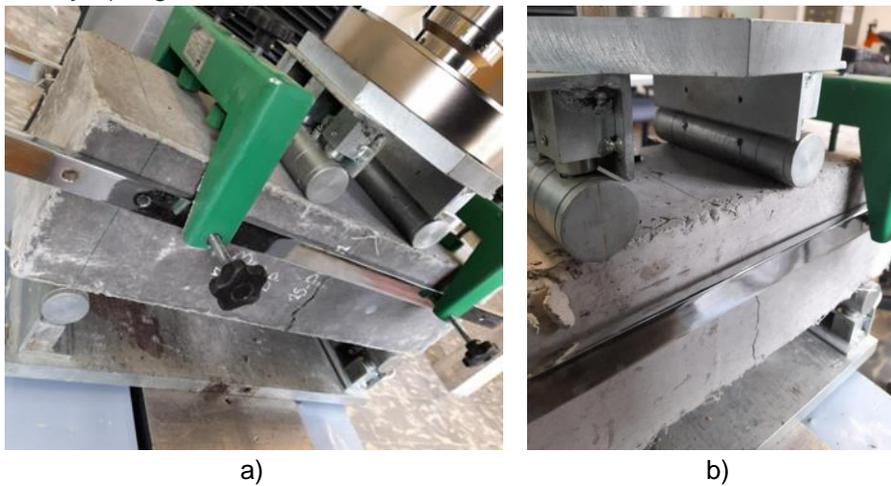


#### 4.4.2. Análisis de Resultados

En esta sección se realizó el análisis de resultados de las probetas ensayadas según como se describió previamente, los resultados completos son presentados en el Anexo E: Resultados Individuales Ensayo a Flexión ASTM C1609. Como se esperaba las probetas con adiciones de fibra de  $4.5\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  tuvieron un comportamiento dúctil y esto se ve reflejado en el ancho de fisura presentado después de alcanzada la carga máxima (como se conoce de la mecánica de materiales las fisuras por flexión inician en la fibra inferior del elemento y crecen verticalmente hasta el eje neutro), la adición de estas controló la apertura abrupta incluso se observaron fisuras menos profundas de modo que se pudo estudiar el efecto de “cocido” o puente de adherencia de las fibras con la matriz de concreto (ensayos como el propuesto por la norma española UNE-EN14651 estudian el comportamiento a flexión controlando la abertura de la fisura, el cual debe limitar en máximo 3mm (0.12in), sin embargo, este análisis se sale del alcance de la presente investigación).

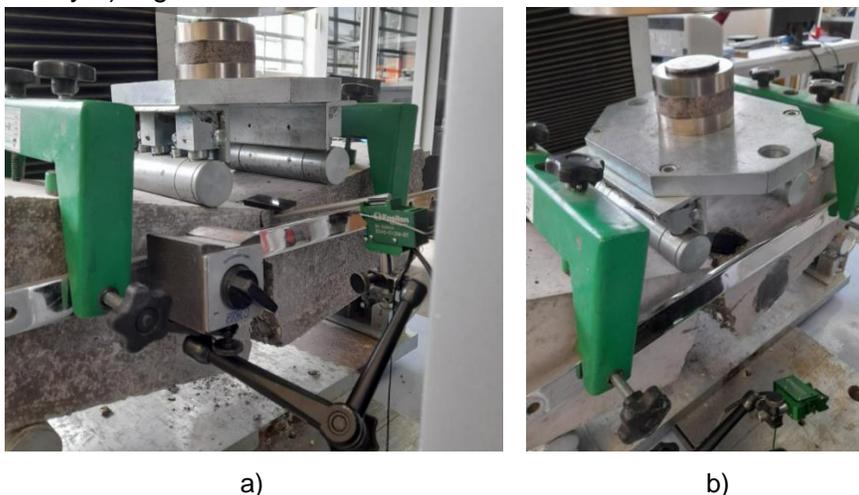
La capacidad de carga como se observó de las curvas carga-deflexión comenzó a disminuir de una manera controlada, los patrones de fisuras representativos para los concretos reforzados con fibras se pueden observar en la Fotografía 4-7 (Todas las vigas ensayadas incluyendo las probetas control sin adición de fibras fallaron por medio de una sola grieta que se propagó hasta la rotura de la probeta).

**Fotografía 4-7:** Patrones de fisuras dúctiles ensayo a flexión ASTM C1609. a) Viga Mezcla M03 y b) Viga Mezcla M06.



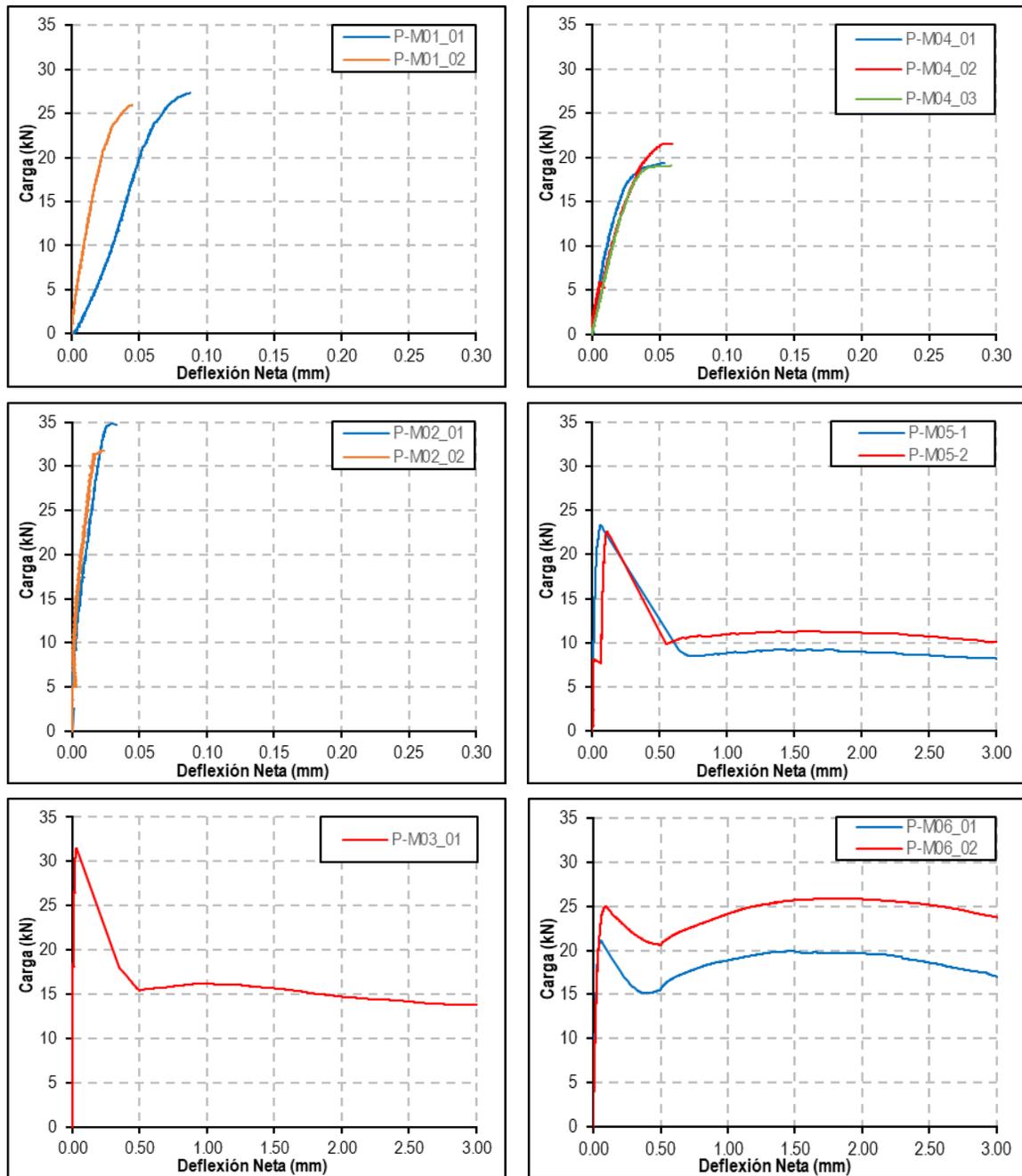
A diferencia de la falla dúctil encontrada en las probetas de concreto fibro-reforzado, los patrones de fisuras para las probetas sin adición de fibras y con una adición baja de  $1.8\text{kg/m}^3$  fue de tipo frágil y abrupta, una vez ocurrida esta, el ensayo se daba por terminado. En la Fotografía 4-8 se presentan dos probetas con falla frágil.

**Fotografía 4-8:** Patrones de fisuras frágiles ensayo a flexión ASTM C1609. a) Viga Mezcla M01 y b) Viga Mezcla M04.



En la Gráfica 4-4 y Tabla 4-8 se indican los resultados y cálculos de los parámetros obtenidos para las curvas experimentales de carga-deflexión, el promedio entre dos y tres especímenes ensayados por diseño (X) y su desviación estándar (S) (Ver Anexo E: Resultados Individuales Ensayo a Flexión ASTM C1609).

**Gráfica 4-4:** Carga-Deflexión vigas patrón (control) a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN.



a)

b)

**Tabla 4-8:** Resumen de parámetros a flexión vigas patrón (control).

Parámetros de Flexión	M01			M02			M03 <sup>1</sup>			M04			M05			M06 <sup>2</sup>		
	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)
P <sub>1</sub> (kN)	26.61	0.68	2.55	33.30	1.49	4.47	31.40	-	-	19.99	1.14	5.69	22.58	0.73	3.21	23.00	1.94	8.43
δ <sub>1</sub> (mm)	0.07	0.02	32.08	0.03	0.003	11.54	0.031	-	-	0.06	0.002	2.70	0.10	0.04	39.83	0.07	0.02	26.90
f <sub>1</sub> (MPa)	3.31	0.07	2.06	4.16	0.20	4.73	3.88	-	-	2.47	0.12	4.85	2.85	0.001	0.02	2.88	0.26	9.14
P <sub>P</sub> (kN)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.85	-	-
δ <sub>P</sub> (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.91	-	-
f <sub>P</sub> (MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.26	-	-
P <sub>600</sub> <sup>150</sup> (kN)	-	-	-	-	-	-	15.89	-	-	-	-	-	9.63	1.122	11.65	20.28	2.47	12.16
f <sub>600</sub> <sup>150</sup> (MPa)	-	-	-	-	-	-	1.96	-	-	-	-	-	1.22	0.181	14.83	2.54	0.33	12.86
P <sub>300</sub> <sup>150</sup> (kN)	-	-	-	-	-	-	16.18	-	-	-	-	-	10.29	1.024	9.96	19.93	-	-
f <sub>300</sub> <sup>150</sup> (MPa)	-	-	-	-	-	-	2.00	-	-	-	-	-	1.31	0.172	13.15	2.48	-	-
P <sub>150</sub> <sup>150</sup> (kN)	-	-	-	-	-	-	13.76	-	-	-	-	-	9.17	0.953	10.39	20.39	3.36	16.47
f <sub>150</sub> <sup>150</sup> (MPa)	-	-	-	-	-	-	1.70	-	-	-	-	-	1.16	0.158	13.57	2.55	0.44	17.16
T <sub>150</sub> <sup>150</sup> (J)	2.60	0.01	0.36	5.12	2.01	39.27	50.33	-	-	1.50	0.23	15.16	34.25	1.666	4.86	65.34	9.08	13.90
R <sub>T,150</sub> <sup>150</sup>	3.26	0.10	2.91	5.23	2.25	42.99	53.43	-	-	2.49	0.24	9.78	50.69	4.087	8.06	94.24	5.21	5.53

**Nota:** <sup>1</sup>El resultado de la vigueta M\_03\_02 fue descartado de los siguientes análisis debido a que la probeta falló por fuera del tercio medio.

<sup>2</sup>La viga M06\_02 tuvo comportamiento de tipo endurecimiento, por lo tanto, el valor tomado para la deflexión aproximada a L/300 coincide con el valor para su carga pico P<sub>p</sub>.

Página intencionalmente en blanco

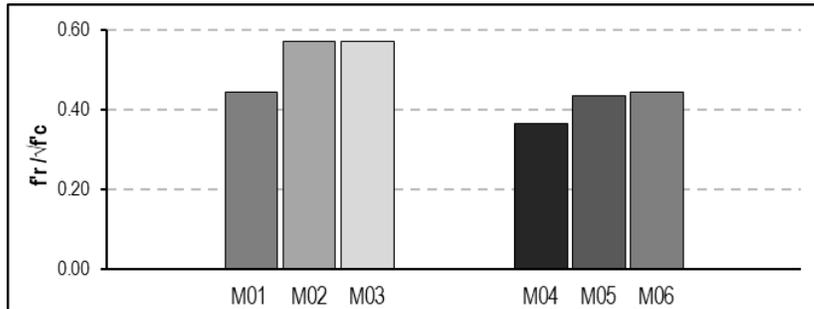
De las curvas carga-deflexión Gráfica 4-4 se puede observar principalmente que debido a la naturaleza del material y la proporción adicionada su comportamiento como se ha descrito es del tipo *softening* o ablandamiento. Sin embargo, para una deflexión aproximada en  $L/300$  ( $\delta=1.50\text{mm} \pm 0.50$ ) la carga residual tuvo un pequeño incremento, esta cresta en el comportamiento a flexión se denominó como ( $f_{300}^D$ ) y se considera uno de los parámetros más importantes para la comparación del desempeño residual de concretos reforzados con fibras después del agrietamiento usados en esta investigación.

Adicionalmente, cabe resaltar de la Tabla 4-8 que la probeta P-M06\_02 fue la única que presentó un aumento de la resistencia después de la fisuración de casi 11.65% esto debido a la cantidad volumétrica adicionada, sin embargo, al igual que las otras probetas de igual o menor ( $V_f$ ) tuvo una pendiente relativamente baja después del agrietamiento lo que está relacionado con el bajo módulo de elasticidad de las fibras proporcionadas.

En los resultados obtenidos resumidos en la Tabla 4-9 se puede observar que el módulo de ruptura aumentó con la adición de fibras entre un 25% a 17% para las mezclas M02 y M03 y entre un 15% a 17% para las mezclas M05 y M06 respectivamente con respecto a su mezcla patrón. Adicionalmente y al igual que en la figura 4.8 del ACI 544.1R-96 se propone la Gráfica 4-5 con el fin de comparar el efecto del contenido de fibra con la relación normalizada entre el módulo de ruptura y el esfuerzo a compresión ( $\sqrt{f'_c}$ ) (calculados con los valores obtenidos previamente y resumidos en la Tabla 4.5).

**Tabla 4-9:** Relación de la tenacidad y el módulo de ruptura con  $\sqrt{f'_c}$ .

Mezcla	$V_f(l_f/d_e)$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	T (J)	$f_r/\sqrt{f'_c}$	$T/\sqrt{f'_c}$
M01	0	55.66	3.31	2.60	0.44	0.35
M02	16	53.23	4.16	5.12	0.57	0.70
M03	52	46.36	3.88	50.33	0.57	7.39
M04	0	45.96	2.47	1.50	0.36	0.22
M05	39	42.95	2.85	34.25	0.43	5.23
M06	65	42.07	2.88	65.34	0.44	10.07

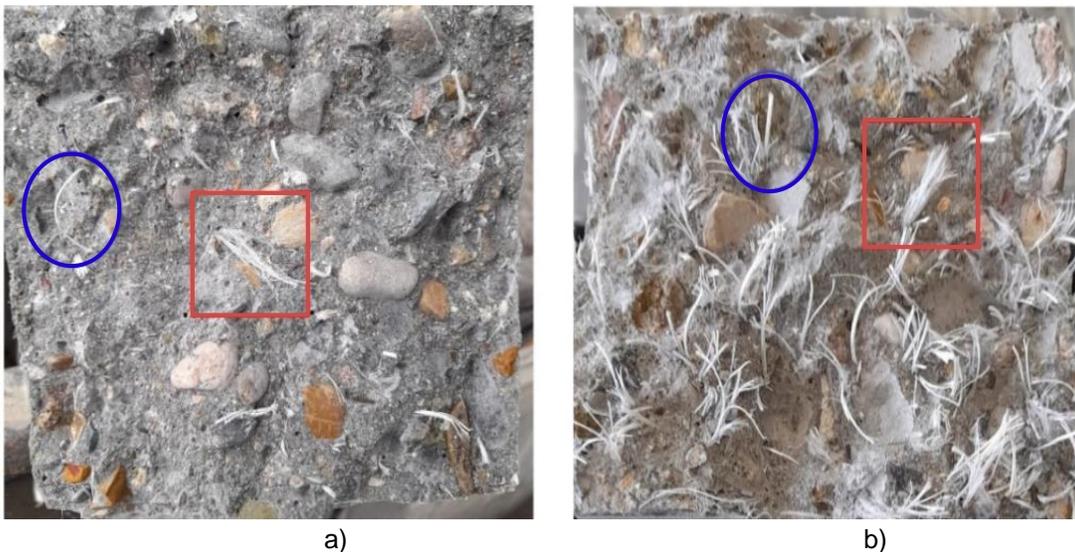
**Gráfica 4-5:** Relación entre módulo de ruptura y esfuerzo a compresión.

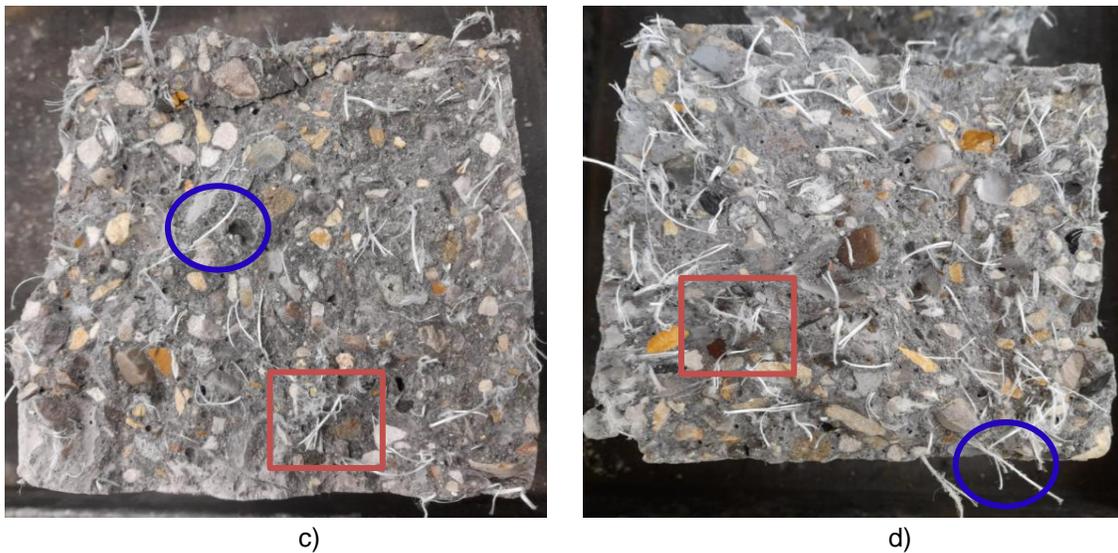
De manera que se puede expresar el módulo de ruptura en función de la resistencia a compresión, en la tabla 4-10 se compara las relaciones obtenidas con la norma NSR-10.

**Tabla 4-10:** Ecuaciones para módulo de ruptura teóricas vs experimentales.

Autor	Ecuación	Lista
Experimental	$f_r=0.57\sqrt{f_c}$	Ec. 4-2
	$f_r=0.44\sqrt{f_c}$	Ec. 4-3
NSR-10	$f_r=0.62\sqrt{f_c}$	Ec. 4-4

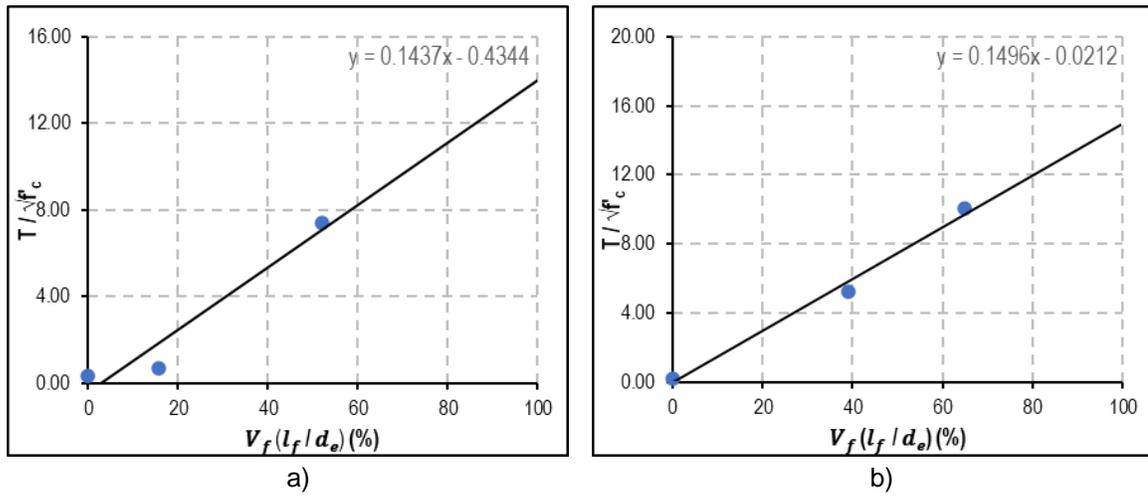
Por otro lado, en las secciones de falla de la Fotografía 4-9 se pueden observar entre otras cosas, los procesos de transferencia de carga de extracción (rojo) y despegado de las fibras (azul) (debonding and pull-out).

**Fotografía 4-9:** Secciones de falla a flexión. a) 1.8kg/m<sup>3</sup>, b) 6.0kg/m<sup>3</sup>, c) 4.5kg/m<sup>3</sup> y d) 7.5kg/m<sup>3</sup>.



Para cada una de las adiciones realizadas se puede observar en primer lugar, que las fibras dentro de la matriz tuvieron una óptima distribución ya que no se presentan concentraciones locales de fibras en bolas o “erizos” y en segundo, se pueden observar dos tipos de falla en las fibras, unas muy similares a los encontrados en los ensayos a tensión donde al final de la carga última las fibras tenían una apariencia de “despeinadas” y otras fibras fallaron simplemente despegándose de la matriz, como era de esperarse la longitud embebida de las fibras “despeinadas” en comparación con las fibras que se deslizaron fue mayor.

Finalmente, se puede describir la relación entre la tenacidad con la resistencia a compresión en función del producto  $V_f (l_f/d_e)$  y se puede concluir que esta aumenta significativamente con la adición de fibras, en la Gráfica 4-6 se puede observar además que este comportamiento es indiferente al tamaño del agregado ya que según las ecuaciones propuestas por la línea de tendencia la pendiente para ambos tipos de diseño de mezcla es semejante.

**Gráfica 4-6:** Relación de la tenacidad en función de  $V_f (l_f/d_e)$  a) 19TMN y b) 12.7TMN.

Como se ha mencionado, las resistencias residuales obtenidas de las curvas asociadas a deflexiones equivalentes a  $L/300$  y  $L/150$  ( $\delta=1.5\text{mm}$  y  $\delta=3.0\text{mm}$ ) medidas en el centro del espécimen sirven para describir el comportamiento después de la fisuración de los concretos reforzados con fibra ya que indican la capacidad de la matriz de recuperarse después de la falla, en la Tabla 4-11 se resumen estos parámetros y se obtuvo el cociente de estos con respecto al módulo de ruptura.

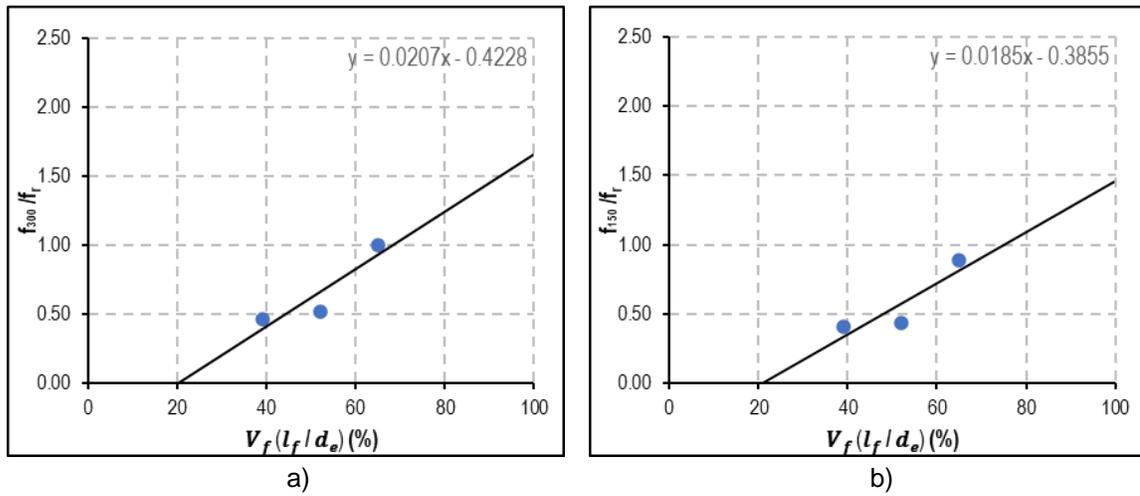
**Tabla 4-11:** Resumen de parámetros de flexión  $f_{300}^D$  y  $f_{150}^D$  con respecto a módulo de ruptura.

Mezcla	$V_f (l_f/d_e)$ (%)	$f_r$ (MPa)	$f_{300}^D$ (MPa)	$f_{150}^D$ (MPa)	$f_{300}^D/f_r$	$f_{150}^D/f_r$
M01	0	3.31	-	-	-	-
M02	16	4.16	-	-	-	-
M03	52	3.88	2.00	1.7	0.515	0.438
M04	0	2.47	-	-	-	-
M05	39	2.85	1.31	1.16	0.460	0.407
M06	65	2.88	2.87	2.55	0.997	0.885

La tendencia de los esfuerzos residuales  $f_{300}^D$  y  $f_{150}^D$  es lineal ascendente como se esperaba a mayor cantidad de adición de fibras mayores esfuerzos residuales. En la Gráfica 4-7 se puede observar además que este comportamiento es indiferente al tamaño del agregado ya que

según las ecuaciones propuestas por la línea de tendencia la pendiente para ambos tipos de diseño de mezcla es semejante.

**Gráfica 4-7:** Tendencia de esfuerzos residuales a)  $f_{300}$  y b)  $f_{150}$ .





## **Capítulo 5. Comportamiento a Flexión de Vigas de PFRC Bajo Cargas Cíclicas – Programa Experimental Parte III**

En el siguiente capítulo se evaluó el deterioro mecánico de vigas cuando han sido sometidas a dos tipos de cargas externas de naturaleza cíclica (C1 y C2) aplicadas en su tercio central comparando la variación de los parámetros de carga y esfuerzo residual  $P_{600}^D$ ,  $P_{150}^D$ ,  $f_{600}^D$  y  $f_{150}^D$  asociados a las deflexiones netas L/600 y L/150 respectivamente y comparando la pérdida de tenacidad calculada del área bajo la curva carga-deflexión y el esfuerzo a flexión equivalente (parámetros  $T_{150}^D$  y  $R_{T,150}^D$ ) con los parámetros obtenidos en el capítulo anterior. Por otra parte, se tomaron los tiempos de llegada de onda ultrasónica antes y después de aplicada las cargas cíclicas y se calculó la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) con el fin de evaluar un posible deterioro o cambio a nivel microscópico en la matriz de concreto debido a la aparición de microfisuras imperceptibles. Los ensayos fueron realizados con base en estándares y métodos propuestos en normas vigentes para el análisis de materiales compuestos.

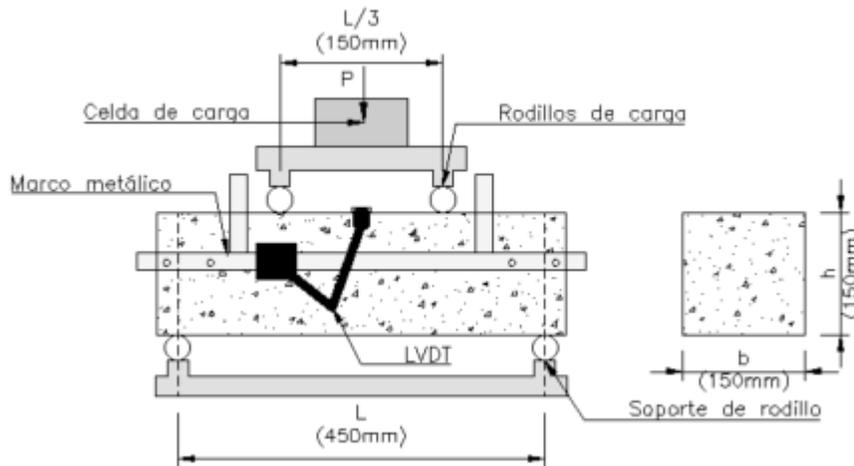
### **5.1. Comportamiento a Flexión Bajo Cargas Cíclicas**

#### **5.1.1. Cargas Cíclicas**

Se aplicaron dos patrones de carga de naturaleza cíclica con una amplitud constante en una viga simplemente apoyada a flexión pura con cuatro puntos de apoyo (ver Figura 5-1: Esquema ensayo a flexión bajo cargas cíclicas, la cual es la misma configuración usada para el ensayo a flexión por la norma ASTM C1609 descrita en la sección 4.4.1 ) con una carga equivalente a 0.65 veces el módulo de rotura obtenido previamente (ver sección 4.4), el cual se resume en la Tabla 5-1 variando la cantidad de ciclos, el primero para una cantidad de 40 ciclos y el segundo para un total de 80 ciclos, en ambos casos la amplitud de la carga fue controlada por el equipo a una velocidad constante de 5mm/min. Los

patrones de carga fueron configurados en el software del equipo TRAPEZIUM X para el modo de ensayo "Cycle", el cual es usado para hacer carga y descarga permitiendo a ajustar la fuerza máxima y mínima, la velocidad de aplicación de esta y la cantidad de ciclos por ensayo.

**Figura 5-1:** Esquema ensayo a flexión bajo cargas cíclicas.



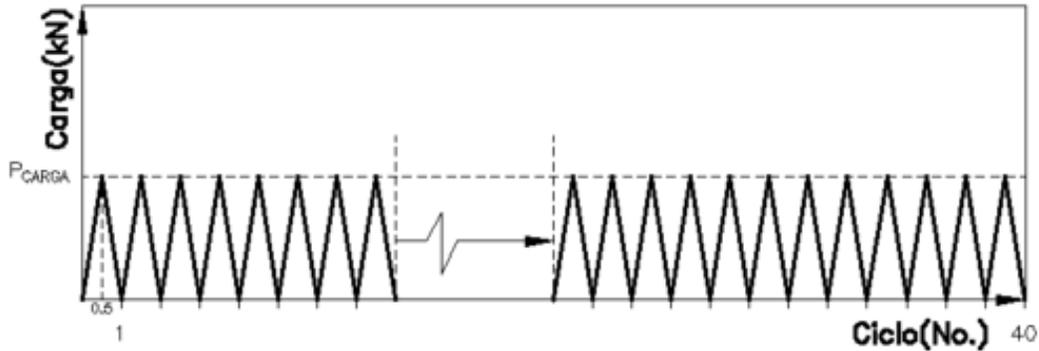
En la Tabla 5-1 se indica la amplitud de la carga cíclica para cada grupo de M01 a M06 la cual corresponde al 65% de la carga promedio de rotura obtenida previamente de los ensayos a flexión.

**Tabla 5-1:** Amplitud de carga cíclica.

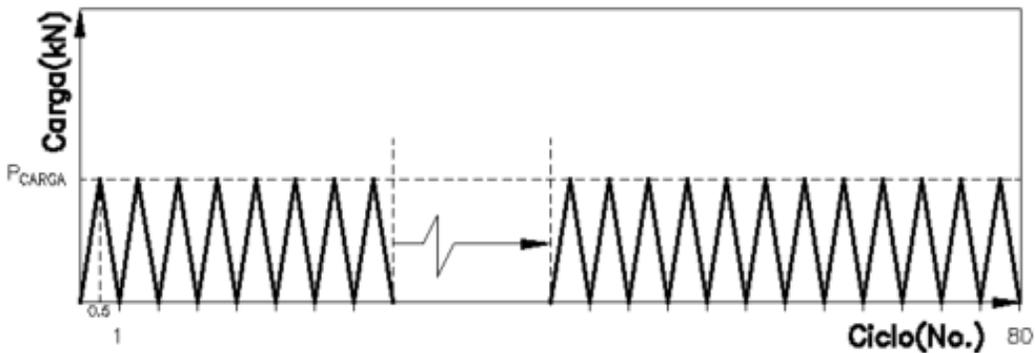
Mezcla	$P_{\text{CARGA}}$ (kN)
M01	$17.30 \pm 0.5$
M02	$21.65 \pm 0.5$
M03	$20.41 \pm 0.5$
M04	$13.00 \pm 0.5$
M05	$14.68 \pm 0.5$
M06	$14.95 \pm 0.5$

En las Gráficas 5-1 y 5-2 se ilustra esquemáticamente los patrones de carga, la amplitud de la carga ( $P_{\text{CARGA}}$ ) y la cantidad de ciclos por ensayo.

Gráfica 5-1: Patrón de carga C1.



Gráfica 5-2: Patrón de carga C2.



### 5.1.2. Deterioro de Parámetros de Flexión

En la Tabla 5-2 se puede observar que el comportamiento muestra una caída repentina después de la fisuración medido desde la carga máxima ( $P_1$ ) hasta la carga residual ( $P_{600}^D$ ) lo que claramente significa una pérdida de rigidez.

Tabla 5-2: Comportamiento de ablandamiento medido desde  $P_{600}$

Mezcla		Control			Carga C1			Carga C2		
		$P_1$	$P_{600}^{150}$	Dif (%)	$P_1$	$P_{600}^{150}$	Dif (%)	$P_1$	$P_{600}^{150}$	Dif (%)
TMN19.0	6.0kg/m <sup>3</sup>	31.40	15.89	49.39	26.81	12.11	54.83	24.06	9.24	61.60
TMN12.7	4.5kg/m <sup>3</sup>	22.58	9.63	57.35	24.50	11.60	52.65	25.79	8.67	66.39
TMN12.7	7.5kg/m <sup>3</sup>	23.00	20.28	11.82	24.51	19.86	18.97	21.44	13.16	38.63

La diferencia porcentual en la capacidad de recuperación de la fuerza entre la carga máxima pico y la carga residual disminuyó significativamente después de aplicadas las

cargas externas cíclicas (C1 y C2) en comparación con los grupos patrón. Este comportamiento era de esperarse, ya que las cargas cíclicas pueden causar una degradación en la capacidad de carga del material.

En el caso del grupo con adiciones de 6.0kg/m<sup>3</sup> (M03) de fibra, la diferencia porcentual de la capacidad de recuperación de la fuerza disminuyó de 54.83% a 61.60% para las cargas C1 y C2, respectivamente, en comparación con el grupo patrón. Esto indica una reducción significativa en la capacidad de recuperar la fuerza después de aplicadas las cargas cíclicas.

Por otro lado, para adiciones de 7.5kg/m<sup>3</sup>, la diferencia porcentual fue menor, siendo de 18.97% a 38.63% para las cargas C1 y C2, respectivamente. Esto sugiere que la capacidad de recuperación de la fuerza se mantuvo en niveles relativamente más altos en comparación con los otros grupos de adiciones de fibra.

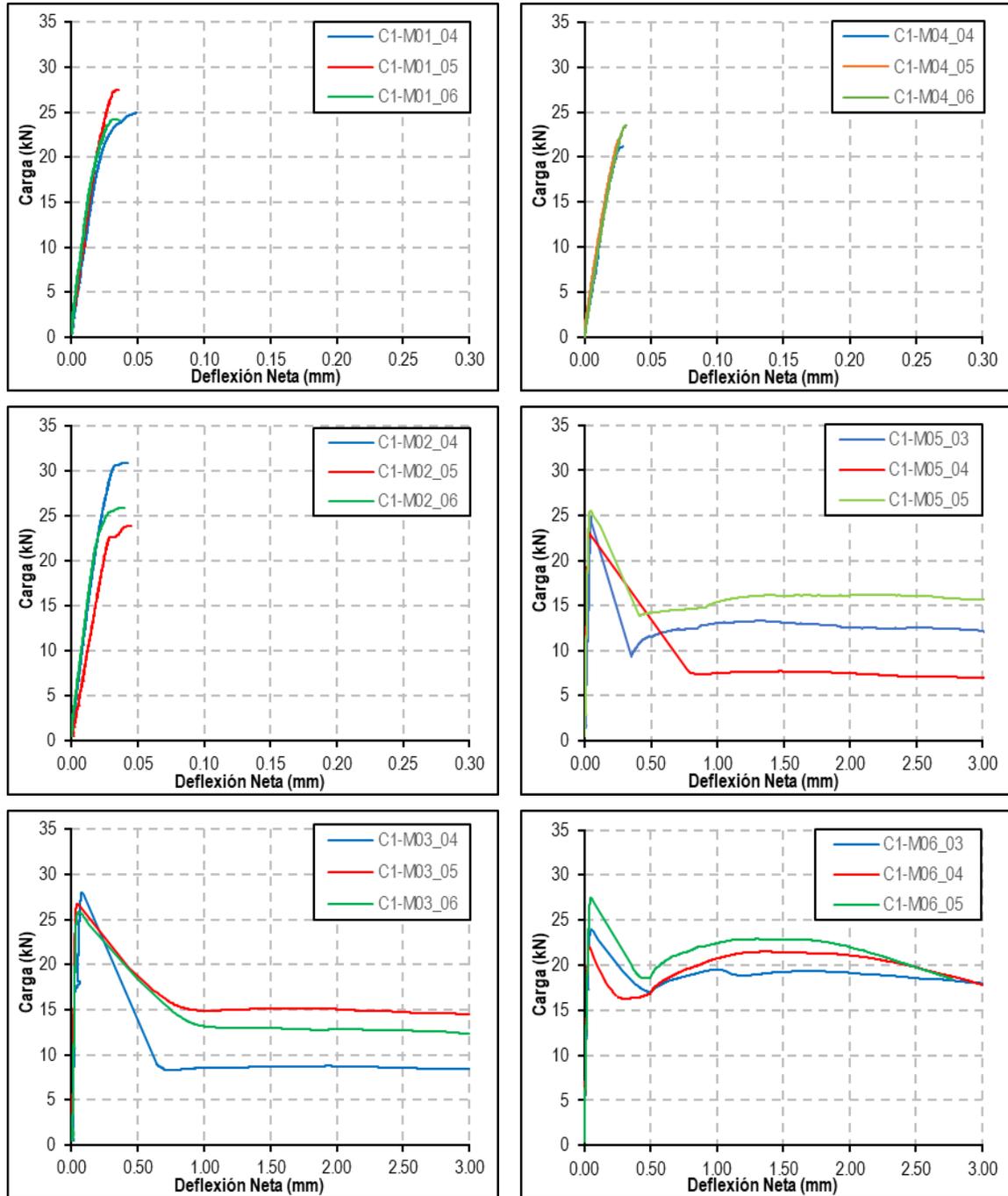
Sin embargo, en el caso del grupo con adiciones de 4.5kg/m<sup>3</sup> (M05) de fibra, se observa un comportamiento atípico. La fuerza y, por lo tanto, el esfuerzo residual aumentó con 40 repeticiones, pero disminuyó con 80 ciclos en comparación con el promedio del grupo patrón.

Las cargas cíclicas tienen un impacto significativo en la capacidad de recuperación de la fuerza en los elementos de concreto reforzados con fibras de polipropileno. La magnitud de esta disminución varía según la cantidad de fibra adicionada y el número de ciclos aplicados.

En las Gráfica 5-3 y 5-4 y Tablas 5-3 y 5-4 se resumen los resultados y cálculos de los parámetros de flexión obtenidos para las curvas experimentales de carga-deflexión después de aplicados los patrones de carga C1 y C2, el promedio entre dos y tres especímenes ensayados por diseño ( $\bar{X}$ ), su desviación estándar ( $S$ ) y su coeficiente de variación  $CV$  (%) (Ver Anexo E: Resultados Individuales Ensayo a Flexión ASTM C1609), los cuales son usados adelante para establecer el efecto de la aplicación de la carga externa repetidamente sobre las propiedades de flexión intrínsecas de cada grupo.

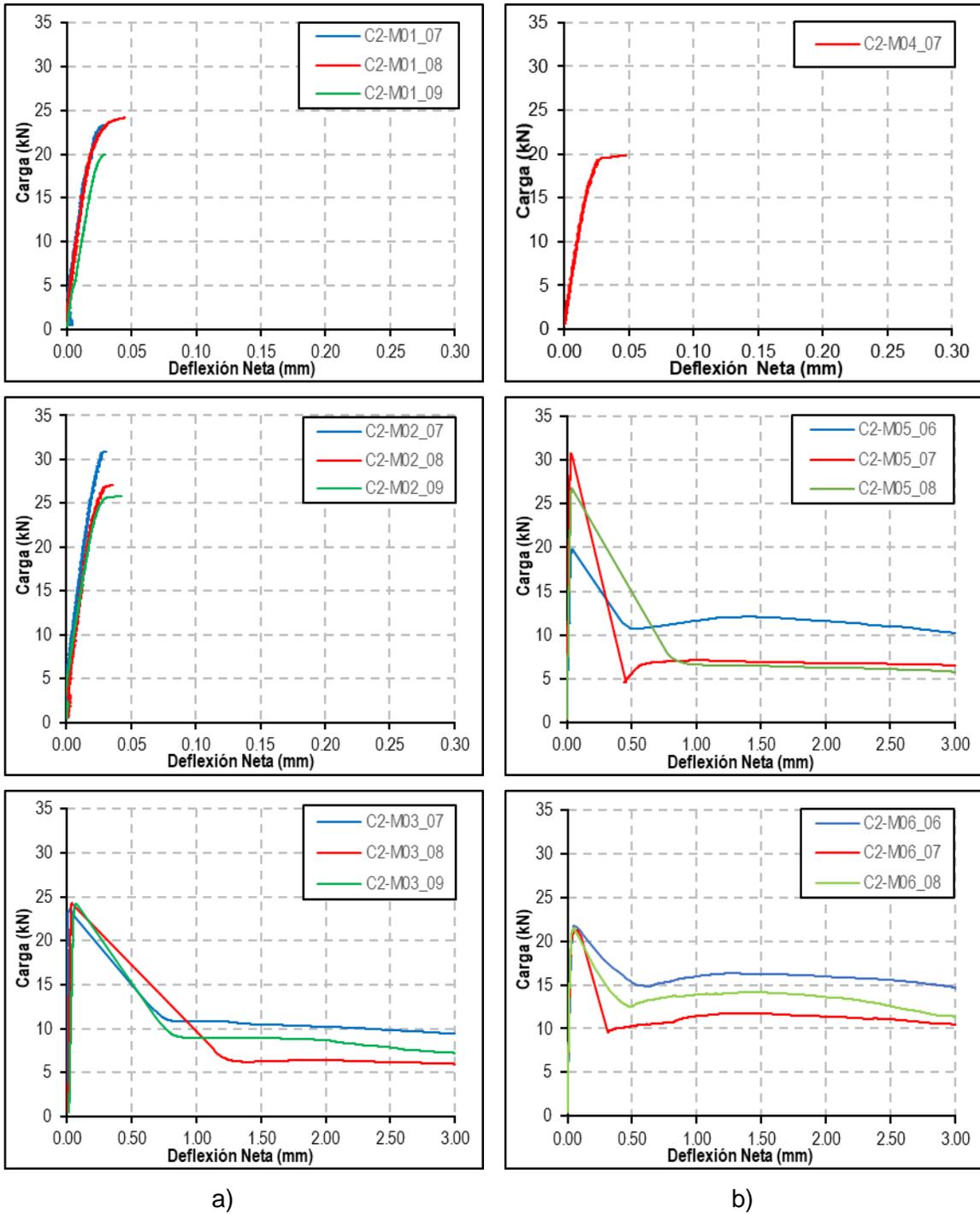
**Carga C1**

**Gráfica 5-3:** Carga-Deflexión después de C1 a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN.



a)

b)

**Carga C2****Gráfica 5-4:** Carga-Deflexión después de C2 a) 19mmTMN y b) 12.7mmTMN.

**Tabla 5-3:** Resumen de parámetros de flexión después de carga C1.

Parámetros de Flexión	M01			M02			M03			M04			M05			M06		
	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)												
$P_1$ (kN)	25.54	1.43	5.60	26.89	2.98	11.09	26.81	0.89	3.33	22.23	0.99	4.45	24.50	1.00	4.08	24.51	2.28	9.31
$\delta_1$ (mm)	0.04	0.00	9.99	0.04	0.00	5.24	0.06	0.02	28.19	0.03	0.00	8.30	0.45	0.01	15.41	0.05	0.005	10.71
$f_1$ (MPa)	3.16	0.21	6.65	3.30	0.37	11.11	3.30	0.11	3.41	2.75	0.05	1.93	2.85	0.29	10.14	3.10	0.28	8.94
$P_P$ (kN)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\delta_P$ (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$f_P$ (MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$P_{600}^{150}$ (kN)	-	-	-	-	-	-	12.11	2.80	23.13	-	-	-	11.60	2.79	24.01	19.86	1.12	5.62
$f_{600}^{150}$ (MPa)	-	-	-	-	-	-	1.49	0.35	23.32	-	-	-	1.36	0.36	26.37	2.51	0.12	4.62
$P_{300}^{150}$ (kN)	-	-	-	-	-	-	12.25	2.64	21.56	-	-	-	12.42	3.52	28.37	21.24	1.45	6.82
$f_{300}^{150}$ (MPa)	-	-	-	-	-	-	1.51	0.33	21.80	-	-	-	1.45	0.44	30.21	2.69	0.15	5.58
$P_{150}^{150}$ (kN)	-	-	-	-	-	-	11.75	2.52	21.44	-	-	-	11.58	3.58	30.89	17.69	0.28	1.56
$f_{150}^{150}$ (MPa)	-	-	-	-	-	-	1.45	0.31	21.69	-	-	-	1.35	0.43	31.97	2.24	0.06	2.78
$T_{150}^{150}$ (J)	2.44	0.39	16.01	2.18	0.54	24.70	43.39	7.01	16.15	1.22	0.21	17.20	40.83	7.91	19.37	61.49	2.96	4.81
$R_{T,150}^{150}$	3.21	0.64	20.11	2.69	0.51	18.96	54.22	9.89	18.23	1.81	0.23	12.64	55.20	8.66	15.69	84.12	6.17	7.34

**Tabla 5-4:** Resumen de parámetros de flexión después de carga C2.

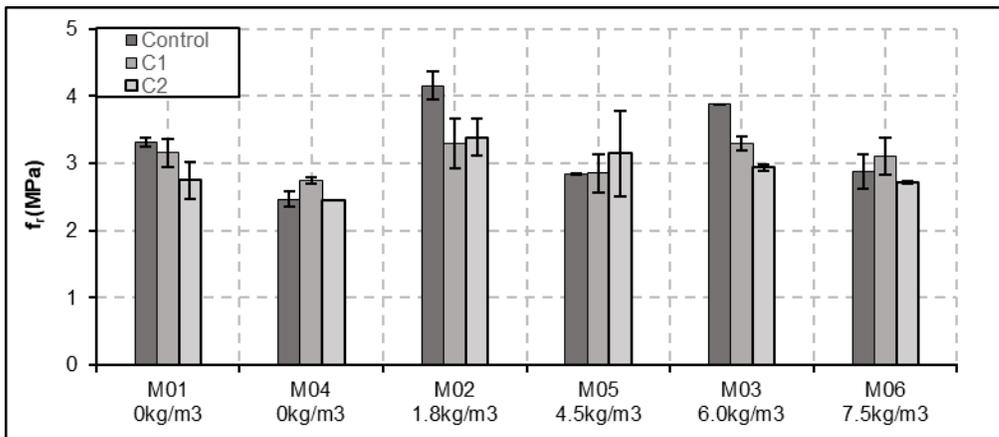
Parámetros de Flexión		M01			M02			M03			M04 <sup>1</sup>			M05			M06		
		X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)	X	S	CV (%)
P <sub>1</sub>	(kN)	22.50	1.81	8.04	27.97	2.10	7.52	24.06	0.31	1.30	19.79	-	-	25.79	4.52	17.52	21.44	0.18	0.82
δ <sub>1</sub>	(mm)	0.03	0.01	19.00	0.04	0.01	24.39	0.04	0.02	41.20	0.0480	-	-	0.04	0.01	13.88	0.06	0.01	10.41
f <sub>1</sub>	(MPa)	2.75	0.27	9.65	3.39	0.27	7.92	2.94	0.05	1.80	2.46	-	-	3.15	0.63	20.12	2.72	0.02	0.68
P <sub>P</sub>	(kN)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
δ <sub>P</sub>	(mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f <sub>P</sub>	(MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P <sub>600</sub> <sup>150</sup>	(kN)	-	-	-	-	-	-	9.24	2.06	22.25	-	-	-	8.67	1.77	20.37	13.16	1.90	14.43
f <sub>600</sub> <sup>150</sup>	(MPa)	-	-	-	-	-	-	1.13	0.26	23.08	-	-	-	1.05	0.17	16.69	1.67	0.24	14.16
P <sub>300</sub> <sup>150</sup>	(kN)	-	-	-	-	-	-	8.62	1.68	19.44	-	-	-	8.56	2.51	29.31	14.11	1.86	13.17
f <sub>300</sub> <sup>150</sup>	(MPa)	-	-	-	-	-	-	1.06	0.21	20.19	-	-	-	1.03	0.26	25.01	1.79	0.23	12.91
P <sub>150</sub> <sup>150</sup>	(kN)	-	-	-	-	-	-	7.55	1.42	18.84	-	-	-	7.52	1.95	25.99	12.15	1.78	14.62
f <sub>150</sub> <sup>150</sup>	(MPa)	-	-	-	-	-	-	0.92	0.18	19.30	-	-	-	0.90	0.20	21.70	1.54	0.22	14.43
T <sub>150</sub> <sup>150</sup>	(J)	2.72	1.03	37.87	4.61	1.79	38.85	33.63	2.21	6.59	2.32			30.88	3.96	12.84	42.58	5.50	12.93
R <sub>T,150</sub> <sup>150</sup>		3.92	1.27	32.26	5.39	1.83	33.94	46.63	3.70	7.93	3.90			42.27	13.66	32.32	66.13	8.04	12.16

**Nota:** <sup>1</sup>La viga C2\_M04\_08 falló en el ciclo número 71, por lo tanto, se tiene información de un solo ensayo.

En las Gráficas 5-5 a 5-7 se muestran los parámetros a flexión más representativos para determinar el deterioro del comportamiento a flexión después de los patrones de carga C1 y C2 para dos diferentes diseños de mezcla control sin fibra y cuatro para diferentes dosificaciones de fibra de polipropileno  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  tales como el módulo de ruptura ( $f_r$ ), el esfuerzo residual ( $f_{300}^D$ ) y la tenacidad. Para las Gráficas 5-5 y 5-6 los resultados se organizaron en orden de cantidad volumétrica adicionada con el propósito de buscar una proporcionalidad gráfica y por otro lado para la Gráfica 5-7 desde luego, solo se indicaron valores para las mezclas con adición de fibras  $4.5\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  y al igual que para las gráficas anteriores se organizaron en orden de cantidad adicionada.

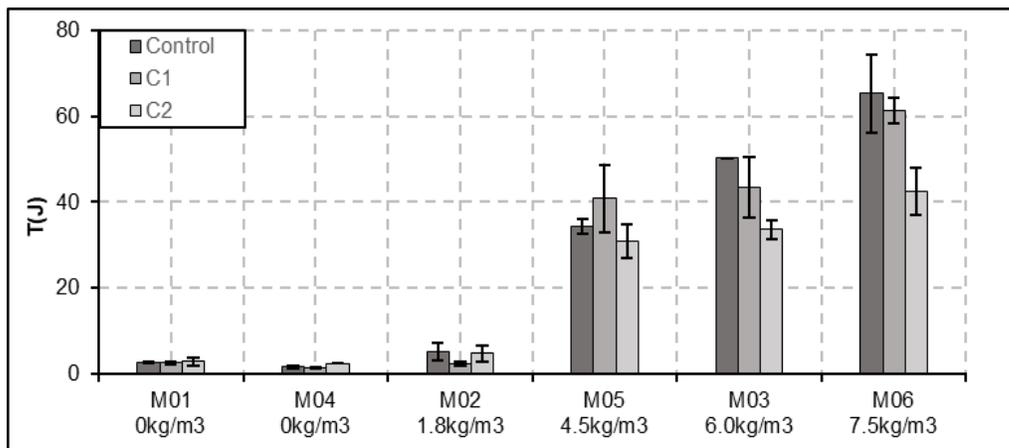
El módulo de ruptura de los elementos según como se puede observar de la Gráfica 5-5 no sufre un cambio determinante o concluyente después de aplicadas las cargas cíclicas ya que se encontraron casos en los que este disminuye proporcionalmente a medida en que se aumentan los ciclos como en el caso del grupo M01, en el cual hubo una reducción de 4.53% a 16.92% para las cargas C1 y C2 respectivamente, sin embargo, se encontraron algunos casos con valores más altos después de aplicados estos, entre los cuales se encuentra las mezclas M04, donde el módulo promedio fue mayor en un 11.34% para el caso de la carga C1, pero para el caso de la carga C2 se mantuvo constante. En los grupos restantes de mezcla M05 y M06, se encuentra un comportamiento similar donde no hay variación significativa entre el grupo control y los grupos después de aplicadas las cargas.

**Gráfica 5-5:** Variación de módulo de ruptura con carga C1 y C2.



La variación de la tenacidad después de aplicados los ciclos de carga se puede observar en la Gráfica 5-6. Para una adición de fibra de  $6.0\text{kg/m}^3$  se perdió una capacidad de absorción de energía de 13.79% a 33.18% para las cargas C1 y C2 respectivamente y para una adición de  $7.5\text{kg/m}^3$  esta capacidad disminuyó de un 5.89% a 34.83% para las cargas C1 y C2 respectivamente, para ambos grupos la reducción de la tenacidad disminuye notablemente después de aplicados 80 ciclos de carga.

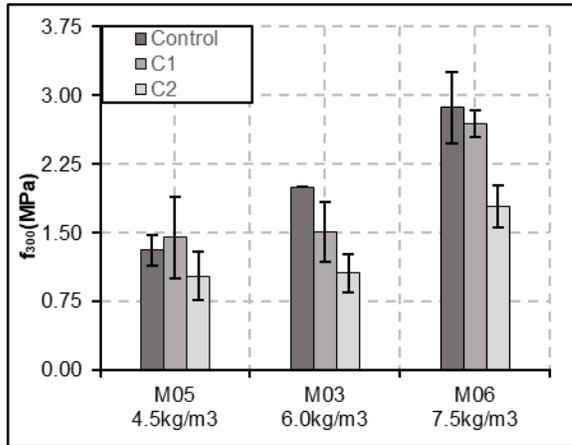
**Gráfica 5-6:** Variación de la tenacidad con Carga C1 y C2.



Por otro lado, el esfuerzo residual ( $f_{300}^D$ ) como se describió en el capítulo 4 y como se puede observar de las gráficas de carga-deflexión de las vigas patrón (control) (Gráfica 4-4) presentaba una pequeña cresta entre las deflexiones netas  $L/450$  y  $L/300$  demostrando que si bien el comportamiento es claramente de ablandamiento las fibras adicionadas lograron resistir y aumentar la capacidad de la carga útil después de la fisuración, por lo tanto, de las gráficas carga-deflexión se puede concluir que esta cresta se aplanó después de aplicadas las cargas (Gráfica 5-3 y Gráfica 5-4).

En la Gráfica 5-7 se indica la variación del esfuerzo residual y como se mencionó anteriormente, se presentan los resultados obtenidos para las adiciones de mezcla igual o mayor a  $4.5\text{kg/m}^3$ , para la mezcla M03 ( $6.0\text{kg/m}^3$  de adición de fibra) el esfuerzo se redujo de 24.5% a 53% para 40 y 80 ciclos de carga respectivamente y para el caso de la mezcla M06 ( $7.5\text{kg/m}^3$  de adición de fibra) se disminuyó de 8% a 28% para 40 y 80 ciclos de carga respectivamente.

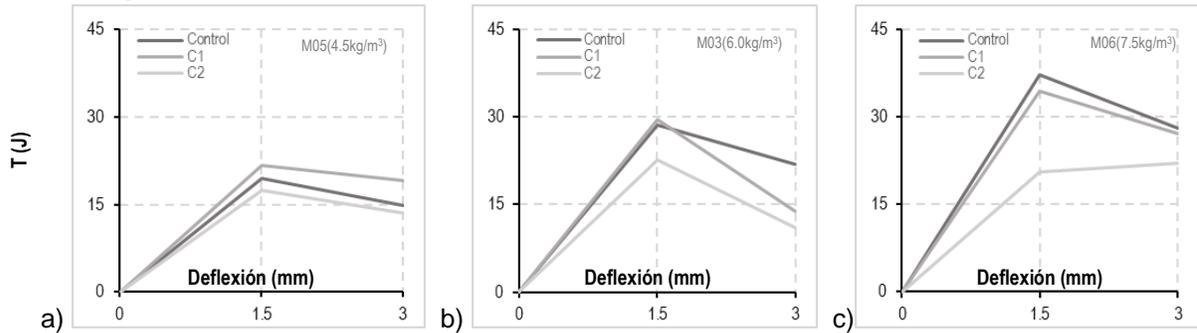
**Gráfica 5-7:** Variación del esfuerzo residual  $f_{300}$  con carga C1 y C2.



Para el grupo de la mezcla M06 la comparación del parámetro de esfuerzo residual  $f_{300}^D$  se realizó con el promedio entre los esfuerzos correspondientes a  $L/300$  de la probeta P-M06\_01 y el esfuerzo máximo ( $f_p$ ) para la probeta P-M06\_02 ya que como se puede observar de la Gráfica 4-4 presentó un comportamiento de endurecimiento después de la fisuración para una deflexión aproximada de  $\delta=1.5\text{mm}$  ( $L/300$ ).

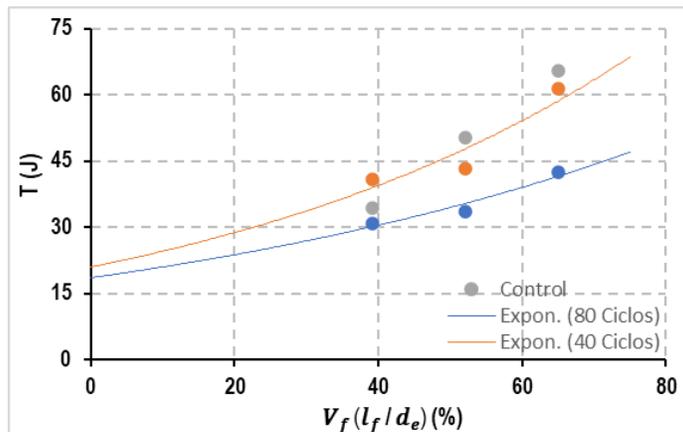
Adicional a lo anterior, es importante destacar que los datos de tenacidad y demás parámetros de flexión calculados para la mezcla M05 mostraron una alta variabilidad entre los datos de las vigas control y los datos después de aplicadas las cargas, con coeficientes de variación para el parámetro ( $f_{300}^D$ ) de 30.2% y 25.0% para C1 y C2 respectivamente, por lo tanto, no representan el comportamiento reflejado en las demás probetas y se consideran no concluyentes.

El comportamiento de ablandamiento se puede identificar claramente en la Gráfica 5-8 donde a partir de una deflexión en la mitad del tramo igual a  $\delta=1.5\text{mm}$  la tenacidad ( $T$ ) de todas las probetas disminuyó, se puede observar como la capacidad de absorción de energía ( $T_{300}^D$ ) después de aplicados 40 ciclos para una deflexión de  $\delta=1.5\text{mm}$  permaneció casi constante en todos los casos y al contrario, para 80 ciclos de carga y descarga, esta si tuvo una reducción notoria de 20.9% y 44.8% con respecto a las probetas control de M03 y M06 respectivamente. Sin embargo, a pesar de que para la adición de  $7.5\text{kg/m}^3$  se pierda en mayor porcentaje la tenacidad, esta se mantiene casi constante hasta terminar el ensayo en  $\delta=3.0\text{mm}$ .

**Gráfica 5-8:** Evolución de la Tenacidad después de C1 y C2. a) 4.5kg/m<sup>3</sup>, b) 6.0kg/m<sup>3</sup> y c) 7.5kg/m<sup>3</sup>.**Tabla 5-5:** Evolución de la Tenacidad después de C1 y C2.

Deflexión (mm)	M03 (J)			M05 (J)			M06 (J)		
	Control	C1	C2	Control	C1	C2	Control	C1	C2
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	28.52	29.48	22.56	19.41	21.73	17.4	37.26	34.37	20.56
3.0	21.81	13.91	11.07	14.84	19.1	13.48	28.08	27.12	22.02
<b>Total</b>	<b>50.33</b>	<b>43.39</b>	<b>33.63</b>	<b>34.25</b>	<b>40.83</b>	<b>30.88</b>	<b>65.34</b>	<b>61.49</b>	<b>42.58</b>

En la Gráfica 5-9 se puede observar la tendencia en la variación de la tenacidad con el número de ciclos y evidentemente, al aumentar la cantidad de ciclos decrece la capacidad de absorción energía en el rango inelástico de la viga debido al deterioro microscópico ocasionado por los patrones de carga impuestos.

**Gráfica 5-9:** Tendencia en la variación de la tenacidad con la cantidad de ciclos.

## 5.2. Ensayo de Ultrasonido

### 5.2.1. Configuración del Ensayo e Instrumentación

Con el fin de medir la calidad y uniformidad del concreto antes y monitorear un posible cambio o deterioro de la matriz después de aplicada la carga cíclica, se calculó la velocidad de propagación de onda o velocidad de pulso ultrasónico (UPV) como se indica en el estándar (ASTM C597, 2009) “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, por lo que se registraron datos de tiempo de llegada de onda ultrasónica en las vigas con ayuda del equipo de medición ultrasónica portátil **Pundit Lab +** de marca **proceq** para control no destructivo en el concreto que emite ondas longitudinales o primarias (tipo P) por medio de un transductor transmisor (T) y un receptor (R) que operan en un rango de ultrafrecuencia de 54kHz mostrado en la Fotografía 5-1 (se recomienda hacer un mínimo de 10 mediciones por ensayo, debido a la variabilidad de los resultados).

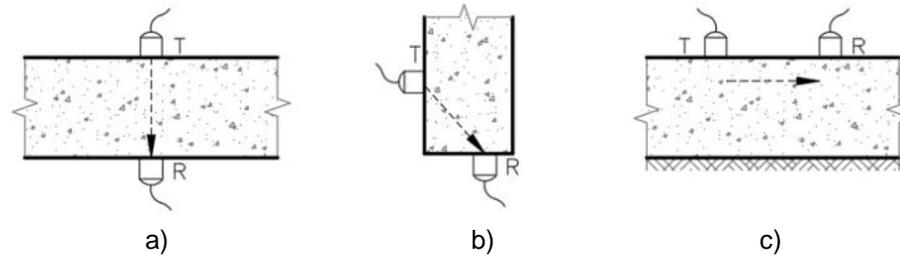
**Fotografía 5-1** Medidor ultrasónico portátil Pundit Lab + de marca Proceq. UN, sede Bogotá – Laboratorio de Estructuras.



Antes de la ejecución del ensayo se sugiere realizar la calibración del equipo (Zeroing the Pundit Lab) según la recomendación del proveedor de este, el cual especifica se debe verificar que al acoplar los transductores utilizando el material de acople sobre una barra de calibración con una distancia estándar (Barra transparente Fotografía 5-1) el tiempo de llegada sea  $25.4\mu\text{s}$ . El método empleado para la obtención de los datos fue directo el cual consiste básicamente en localizar los transductores (transmisor y receptor) en caras opuestas a una distancia “b” (ancho) entre ellos, como se ve en el esquema de la Figura

5-1, el cual es el arreglo más aconsejable porque la energía del pulso es máxima (Naik et al., 2004).

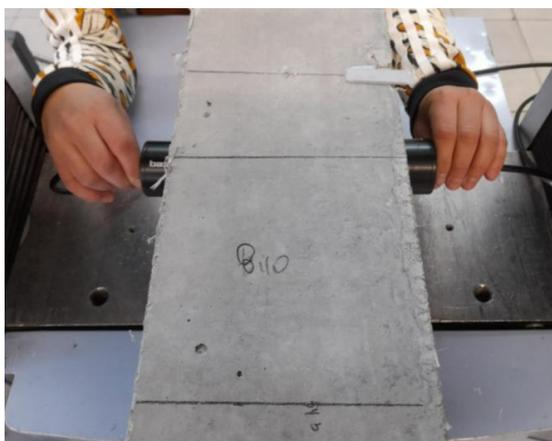
**Figura 5-2:** Configuraciones para medida de velocidad de pulso. a) Método Directo, b) Método semidirecto y c) Método indirecto.



Nota. Adaptado de Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, por T. R. Naik, M. Malhotra, J. S. Popovics, 2003, CRC Press.

Finalmente, para una correcta lectura de los datos es necesario que exista un medio de acople que asegure la transferencia de energía entre los transductores y la matriz de hormigón (ACI Committee 228.2R, 2013), esto se logra con la aplicación de un material viscoso como grasa, jabón líquido, vaselina, gel conductor, entre otros, el proveedor del equipo sugiere incluso alisar la superficie con el fin de mejorar este acople. Para el montaje experimental (Fotografía 5-2) y con el fin de reducir cualquier pérdida de señal se utilizó gel conductor para transmisión de ultrasonido de marca Kramer.

**Fotografía 5-2:** Montaje experimental para cálculo de velocidad de onda ultrasónica. a) Paralelo ancho probeta. b) Paralelo Largo probeta.



a)



b)

### 5.2.2. Análisis de Resultados

La velocidad de pulso medida por el método directo es una relación entre la dimensión del elemento y el tiempo de tránsito (ver ecuación 5-1 tomada de (ASTM C597, 2009), donde L es distancia entre transductores y T el tiempo). Según la clasificación desarrollada por J.R. Leslie y W.J Cheesman se puede evaluar la calidad del concreto con base en las velocidades, las probetas ensayadas están en un rango de condición o calidad “excelente” (Velocidad de pulso > 4570m/s) y “bueno” (Velocidad de pulso entre 3660m/s - 4570m/s) lo cual indica que la estructura interna del concreto compuesta por la pasta de cemento, los agregados y la interacción entre estos tiene un buen comportamiento.

$$V = L/T$$

**Ec. 5-1**

No obstante, en las tablas de registro de tiempo Tablas F-1 a F-12 (ver Anexo F) y Tabla 5-5 de resumen de velocidades por tipo de carga y mezcla, se puede observar las variaciones de la velocidad para las medidas tomadas antes y después (Pre – Post) de aplicada la carga cíclica pueden ser un indicio de daño o deterioro, según (Selleck et al., 1998); (Karaiskos et al., 2015) estos cambios microscópicos en la matriz de concreto ocasionados por cargas mecánicas repetitivas pueden ser fácilmente evaluados por medio de ensayos no destructivos.

**Tabla 5-6:** Resumen de velocidades por tipo de carga y mezcla.

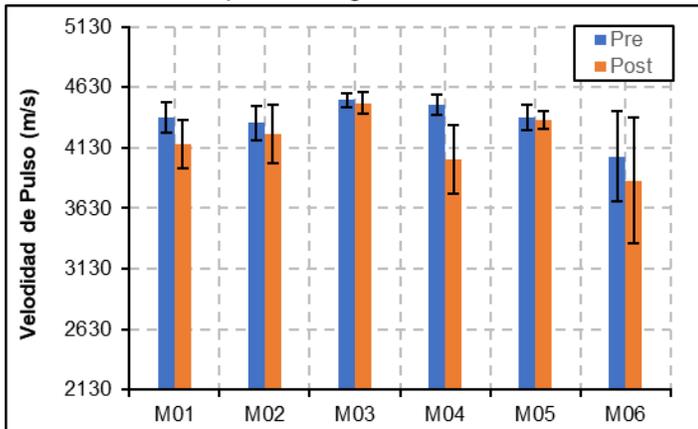
Mezcla	Carga C1					Carga C2				
	Pre		Post		Dif. (%)	Pre		Post		Dif. (%)
	$\bar{v}$ (m/s)	S (m/s)	$\bar{v}$ (m/s)	S (m/s)		$\bar{v}$ (m/s)	S (m/s)	$\bar{v}$ (m/s)	S (m/s)	
<b>M01</b>	4384	127	4161	203	5.09	4429	36	4117	151	7.04
<b>M02</b>	4334	144	4243	245	2.10	4560	97	4537	168	0.50
<b>M03</b>	4522	54	4499	86	0.51	4405	110	4129	82	6.27
<b>M04</b>	4486	87	4034	283	10.08	4670	0	4567	0	2.21
<b>M05</b>	4378	106	4360	76	0.41	4472	100	4464	148	0.18
<b>M06</b>	4058	374	3859	523	4.90	4213	231	4150	263	1.50

Para la mezcla M04 y condición de carga C2 el valor de la desviación estándar es igual a cero debido a que se ensayaron 2 vigas y una de estas falló en el ciclo de carga 71 durante

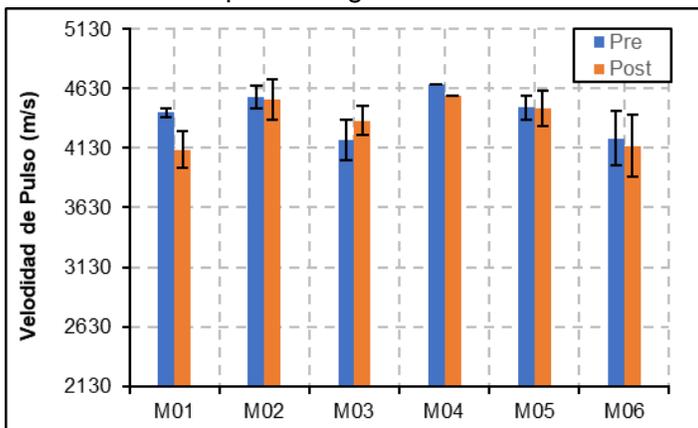
el proceso de carga, por lo tanto, solo se tuvieron en cuenta los datos tomados para un solo ensayo.

En la Gráfica 5-10 y Gráfica 5-11 se proyecta la variación de la velocidad de pulso con la aplicación de los dos patrones de carga, en todos los casos se puede observar que la velocidad se disminuyó después de aplicada la carga, para las mezclas sin fibra M01 y M04 este valor disminuyó de 5.09% a 10.08% para la carga C1 y de 7.04% a 2.21% para la carga C2 respectivamente, sin embargo, en contraste a lo que se esperaba para las mezclas con bajo el patrón de carga C1 las velocidades disminuyeron en mayor proporción después de aplicada la carga que para el patrón de carga C2 con mayores ciclos de carga.

**Gráfica 5-10:** Variación de la velocidad de pulso antes y después de carga para diferente adición de fibra tipo de carga 1.



**Gráfica 5-11:** Variación de la velocidad de pulso antes y después de carga para diferente adición de fibra tipo de carga 2.



# Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo final de maestría es conocer un poco más el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno, cómo influye en las propiedades mecánicas la cantidad volumétrica de adición de fibras en la matriz de concreto y como se afecta el comportamiento a flexión cuando hay un desgaste del material. En los siguientes capítulos conclusiones particulares de cada etapa de ensayo de los materiales:

### 6.1.1. Ensayos a Tensión Fibras de PP

La relación de aspecto ( $\lambda$ ) para una longitud de fibra promedio ( $lf$ ) igual a 53.97mm y un diámetro equivalente aproximado de 673.05mm ( $de$ ) obtenido a partir del método indirecto, sería igual a 80.19 con una diferencia de 7.7% con respecto del valor reportado por el proveedor de la fibra de 74.

El esfuerzo máximo a tensión obtenido para las fibras del grupo patrón (P) fue de 510.26MPa con una diferencia de 14.96% con respecto al reportado por el proveedor de la fibra (Anexo A.4), esta diferencia puede radicar en la metodología, configuración y protocolo de carga ejecutado.

Partiendo de este valor de referencia se puede concluir que después de 110 días de exposición en cuatro concentraciones de iones alcalinos de sodio y potasio (NaOH y KOH, respectivamente) las fibras del grupo que estaban en una concentración que simulaban un ambiente de un concreto tradicional con solo cemento denominado como 0%, fueron las que más reaccionaron a la alcalinidad de la concentración, la resistencia a la tensión última se disminuyó en 16.77% con un valor promedio de la tensión igual a  $424.69 \pm 41.67$ MPa.

Para las concentraciones con adición de humo de sílice entre 5% y 10% se puede decir que, si bien reaccionaron a la concentración alcalina disminuyendo su capacidad a tensión con respecto al grupo patrón de 5.11% a 1.74% respectivamente, estas no perdieron tanta capacidad en comparación a la concentración del 0%.

La resistencia de las fibras para una concentración alcalina con adición de humo de sílice de 15% no resultó afectada por el efecto del ambiente alcalino, estas obtuvieron un valor promedio mayor que las fibras del grupo patrón en 3.21%.

### **6.1.2. Ensayos a Compresión y Módulo de Elasticidad Cilindros**

De los ensayos a compresión se puede concluir que la capacidad de carga disminuyó con la adición de fibras. Para el grupo de TMN 19mm esta varió de 4.37% a 16.71% con adiciones de 1.8kg/m<sup>3</sup> a 6.0kg/m<sup>3</sup> respectivamente y para el grupo de TMN 12.7mm esta varió de 6.55% a 8.46% con adiciones de fibra de 4.5kg/m<sup>3</sup> a 7.5kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

La adición de fibras como se menciona en (ACI Committee 544.1R, 2009) y como se observó en la práctica experimental de este Trabajo Final tiene una influencia en el mecanismo de falla de los cilindros ensayados a compresión, para adiciones de fibras mayores a 4.5 kg/m<sup>3</sup> la falla tuvo un comportamiento más dúctil con respecto al comportamiento frágil presentado en las probetas control y de 1.80kg/m<sup>3</sup> de dosificación.

Adicionalmente, se puede decir que la calidad y/o origen de los materiales (agregado grueso y fino) influyó notablemente en las propiedades mecánicas de las mezclas debido a que se obtuvieron valores de relación de poisson relativamente bajos para el grupo con agregado de tamaño nominal, TMN 12.7mm (entre 0.105 a 0.138) comparados con la información consultada en la literatura y los obtenidos para el agregado de tamaño nominal, TMN 19mm (entre 0.184 a 0.165).

Así mismo, las diferencias en magnitud del módulo de elasticidad entre los dos grupos se atribuyen al origen del agregado grueso. Para las mezclas con agregado grueso TMN de 19mm, el módulo de elasticidad obtenido estuvo entre 31155.61MPa a 27986.27MPa, a diferencia de las mezclas donde se usó un agregado grueso TMN de 12.7mm, su módulo de elasticidad estuvo entre 20181.36MPa a 18800.24MPa.

### 6.1.3. Flexión y Tenacidad del Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno

Como se esperaba, las probetas sin adición de fibra o con una baja cantidad ( $1.8\text{kg/m}^3$ ), tuvieron un comportamiento totalmente frágil y fallaron abruptamente en el tramo central del elemento perdiendo totalmente su capacidad de carga. Las probetas con adiciones de fibra mayor a  $4.5\text{kg/m}^3$  al contrario, tuvieron un comportamiento dúctil de ablandamiento fallando de manera controlada en el tramo central del elemento. Se observó una clara tendencia entre el ancho de fisura de falla y el contenido de fibra.

Después de alcanzada la carga máxima ( $P_1$  ó  $P_P$ ) las probetas patrón con adiciones de  $4.5\text{kg/m}^3$  y  $6.0\text{kg/m}^3$  perdieron casi la mitad de su capacidad de carga en 49.39% y 57.35% respectivamente medida en ( $P_{600}^{150}$ ). Sin embargo, para una adición de  $7.5\text{kg/m}^3$  se perdió solamente un 11.82% de carga. La carga se mantuvo casi constante desde este punto hasta el final del ensayo con solo una variación del 4.77% al 13.40% de la capacidad de resistencia de carga.

A medida que aumenta el contenido de fibra, se observa una mejora proporcional en la capacidad de absorción de energía.

Para mayores contenidos de fibra después de aplicados los patrones de carga de naturaleza cíclica (C1 y C2) el módulo de ruptura se vio levemente afectado por estos. Este comportamiento se debe a que la incorporación de fibras de polipropileno (PP) no mejora significativamente las propiedades antes de la resistencia pico ya que la matriz de concreto falla relativamente al mismo esfuerzo que un concreto simple como se estudió previamente.

Después de aplicar los patrones de carga y descarga (C1 y C2), se observó una evidente pérdida de rigidez en los elementos. Una vez que se alcanzó la carga máxima ( $P_1$  ó  $P_P$ ), las probetas con adiciones de  $4.5\text{kg/m}^3$  y  $6.0\text{kg/m}^3$  experimentaron una reducción de más de la mitad en su capacidad de carga, entre un 54.83% y un 52.66%, respectivamente (medido en ( $P_{600}^{150}$ )) para 40 ciclos de carga. Para 80 ciclos de carga, esta pérdida de rigidez fue aún más significativa, entre un 61.60% y un 66.39%. Sin embargo, en el caso de una adición de  $7.5\text{kg/m}^3$ , la pérdida de rigidez causada por la carga externa fue notablemente menor, con una disminución de solo el 18.97% para 40 ciclos y el 38.62% para 80 ciclos.

Se encontró que después de aplicada las cargas cíclicas, el mayor porcentaje de pérdida de absorción de energía se dio después de una deflexión neta  $L/300$  en la mitad del tramo igual a  $\delta=1.5\text{mm}$ .

Los datos de tenacidad y demás parámetros de flexión calculados para adiciones de  $4.5\text{kg/m}^3$  (M05) mostraron una alta variabilidad entre los datos de las vigas control y los datos después de aplicadas las cargas, con coeficientes de variación para el parámetro ( $f_{300}^D$ ) de 30.2% y 25.0% para C1 y C2 respectivamente.

En cuanto a las velocidades de pulso, se encontró que disminuyeron después de aplicar las cargas cíclicas, sin embargo, no se puede establecer una correlación clara entre la cantidad de ciclos y la velocidad de pulso.

Estos resultados proporcionan una comprensión más profunda del comportamiento de los elementos a flexión reforzados con fibras de polipropileno sometidos a cargas cíclicas, lo cual es importante para el diseño y la aplicación de estructuras sometidas a cargas dinámicas.

## **6.2. Recomendaciones**

El concreto reforzado con fibras ha sido estudiado por mucho tiempo por los investigadores de la rama de materiales debido a su óptimo comportamiento, es utilizado a nivel mundial y nacional en la construcción por sus evidentes beneficios, además es común encontrar en el mercado gran variedad de fibras en cuanto a tamaño, forma y material, sin embargo, a nivel nacional normativo y de formación académica no se ve reflejado la aplicación en diseño del uso de este material compuesto. En consideración con lo anterior, se exponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones.

### **6.2.1. Cantidad de Ensayos**

Una gran limitante en el desarrollo de la investigación fue la cantidad de ensayos que se ejecutaron de manera experimental debido a que se presentaron coeficientes de variación altos, si bien, la norma (ASTM C1116/C1116M, 2010) especifica que la cantidad mínima de ensayos de aceptación para pruebas a flexión es al menos tres (3) especímenes y para ensayos a compresión al menos dos (2) probetas, otras normas relacionadas igualmente con la caracterización del comportamiento de los concretos reforzados con fibras como

RILEM TC 162-TDF especifica una cantidad mínima de al menos 6 especímenes por cada grupo de análisis esto con el fin de disminuir la dispersión de datos.

### 6.2.2. Calibración del Equipo

Según el proveedor de las fibras para una dosificación de  $1.8\text{kg/m}^3$  el esfuerzo residual ( $f_{150}^D$ , según ASTM C1609 o  $f_{e,3}$  según ACI 544.4R-18) indicado en su hoja técnica es igual a  $0.9\text{MPa}$ , sin embargo, como se pudo observar de los ensayos desarrollados para la presente investigación gráficas E-2, E-8, E-14 y tablas relacionadas del Anexo E, los especímenes después de la falla a fisuración perdieron totalmente la capacidad de seguir soportando fuerzas, se recomienda por lo tanto para futuras investigaciones en las que se desee usar esta dosificación para análisis, cambiar la velocidad de aplicación de carga del equipo ya que se ha encontrado que esta puede influir en la resistencia a la flexión de los concretos reforzados con fibras según Kobayashi y Cho, (1981).

### 6.2.3. Ensayos Adicionales

De manera complementaria para la caracterización de las fibras y el efecto de una posible degradación del material cuando está bajo condiciones alcalinas, se recomienda para investigaciones futuras realizar ensayos de la estructura química por medio de la técnica de espectroscopía infrarroja, si bien, Rostami et al., (2019) encontraron que las fibras de PP no se degradaban por la alcalinidad del ambiente de la matriz de concreto, para el caso en particular de esta investigación se recomienda realizar este análisis debido a que las fibras usadas (comunes el mercado nacional) son una mezcla de dos polímeros: Polipropileno y polietileno.

De manera adicional en los ensayos a compresión se recomienda obtener la curva esfuerzo-deformación completa con el fin de conocer la respuesta post-pico y de esta forma poder determinar cuantitativamente la cantidad de disipación de energía (ductilidad) proporcionada por la fibra evidenciada en su modo de fallo.

Para caracterizar el comportamiento a flexión se recomienda realizar ensayos complementarios a la investigación como arrancamiento o pull-out de fibras ya que para un mismo tipo de fibra los resultados se han visto afectados (Bentur & Mindess, 2007), esto debido a que el comportamiento posterior al agrietamiento del concreto se ve

influenciado directamente por la fuerza de extracción de la fibra, ya que como se ha mencionado anteriormente las fibras trabajan como un puente de transferencia de cargas.

Adicionalmente, con el fin de conocer más ampliamente como se ve afectado el comportamiento mecánico de vigas cuando han sido sometidas a cargas externas de naturaleza cíclica, se recomienda para investigaciones futuras evaluar la incidencia del número de ciclos de carga y descarga para diferentes porcentajes de carga.

#### **6.2.4. Predicción del Comportamiento a Flexión por Técnicas no destructivas**

En el anexo F y capítulo 5 se puede encontrar la variación de la velocidad ultrasónica cuando el elemento ha sido sometido a una serie de ciclos de carga y descarga. Se recomienda para futuras investigaciones validar y calibrar un método de ensayo realizando las repeticiones necesarias para definir un comportamiento general con el fin de cuantificar el comportamiento del concreto a flexión por medio de la evaluación de métodos o técnicas de medición no destructivas variando el método de obtención de datos de forma directa, semidirecta o indirecta.

Adicional a lo anterior se recomienda para futuras investigaciones en las que se analiza un desgaste o deterioro del material realizar mediciones de ondas transversales o de cortante (tipo S) con el fin de obtener la evolución del daño la cual es una medida que está en función de la velocidad longitudinal y la velocidad transversal.

## **Anexo A: Caracterización de los Materiales**

## A.1 Granulometría Agregado Grueso

### A.1.1 Agregado Grueso Tipo I (Mezclas M01, M02 y M03)

El agregado grueso empleado para la elaboración de las mezclas M01, M02 y M03, fue suministrado y caracterizado en el laboratorio de materiales del Instituto de Extensión e Investigación (IEI) de la Universidad Nacional de Colombia a continuación el cálculo de sus propiedades principales según las normas NTC 92, NTC 176 y NTC 1775.

**Tabla A-1:** Resumen propiedades físicas agregado grueso – Tipo I.

Parámetro	Abr.	Unidad	Valor
Masa unitaria suelta	M <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1530.30
Masa unitaria compacta	M <sub>c</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1636.25
Gravedad específica aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.69
Gravedad específica saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.66
Absorción	%A	%	0.69
Humedad	%H	%	0.30

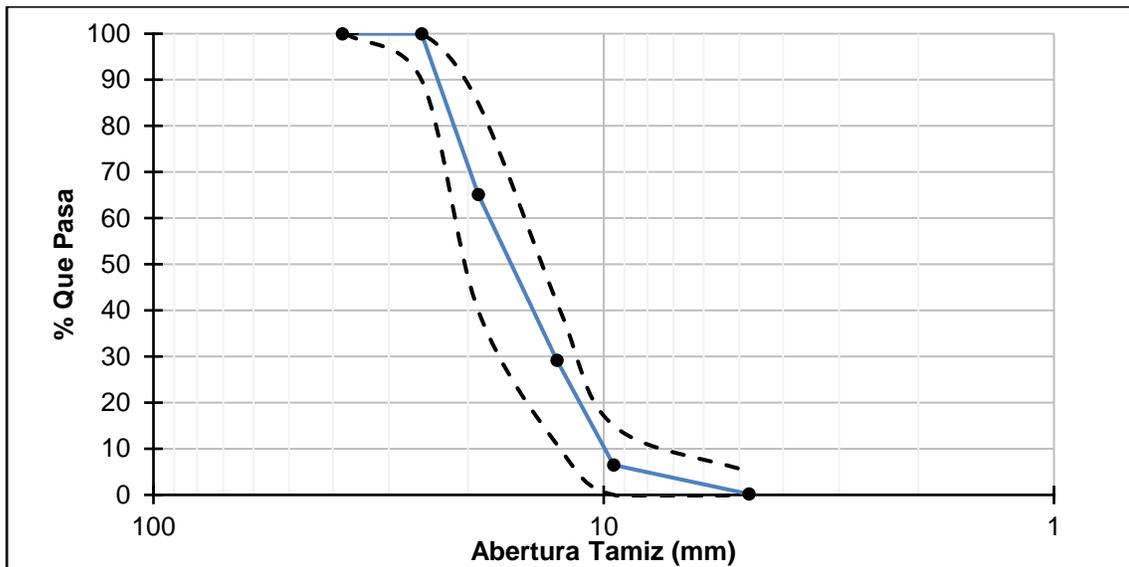
La determinación de la curva granulométrica mediante análisis de tamaño por tamizado según la norma NTC 77, se indica a continuación:

**Tabla A-2:** Análisis por tamizado de agregado grueso – Tipo I.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	% Retenido Acumulado	% Pasa
38.1mm (1 ½")	0.0	0.0	0.0%	100.0%
25.4mm (1")	0.0	0.0	0.0%	100.0%
19.0mm (¾")	1043.2	1043.2	34.9%	65.1%
12.7mm (½")	1072.7	2115.9	70.8%	29.2%
9.51mm (3/8")	679.0	2794.9	93.5%	6.5%
4.76mm (No.4)	189.7	2984.6	99.8%	0.2%
Fondo	4.6	2989.2	100.0%	0.0%
<b>Total</b>	<b>2989.2</b>			

Por lo tanto, el tamaño máximo del agregado nominal (TMN) del agregado grueso Tipo I es 19mm (3/4").

**Figura A-1:** Curva granulométrica agregado grueso – Tipo I.



**A.1.2 Agregado Grueso – Tipo II (Mezclas M04, M05 y M06)**

El agregado grueso empleado para la elaboración de las mezclas M04, M05 y M06, fue suministrado y caracterizado en el laboratorio de materiales del Instituto de Extensión e Investigación (IEI) de la Universidad Nacional de Colombia a continuación el cálculo de sus propiedades principales según las normas NTC 92, NTC 176 y NTC 1775.

**Tabla A-3:** Resumen propiedades físicas agregado grueso – Tipo II.

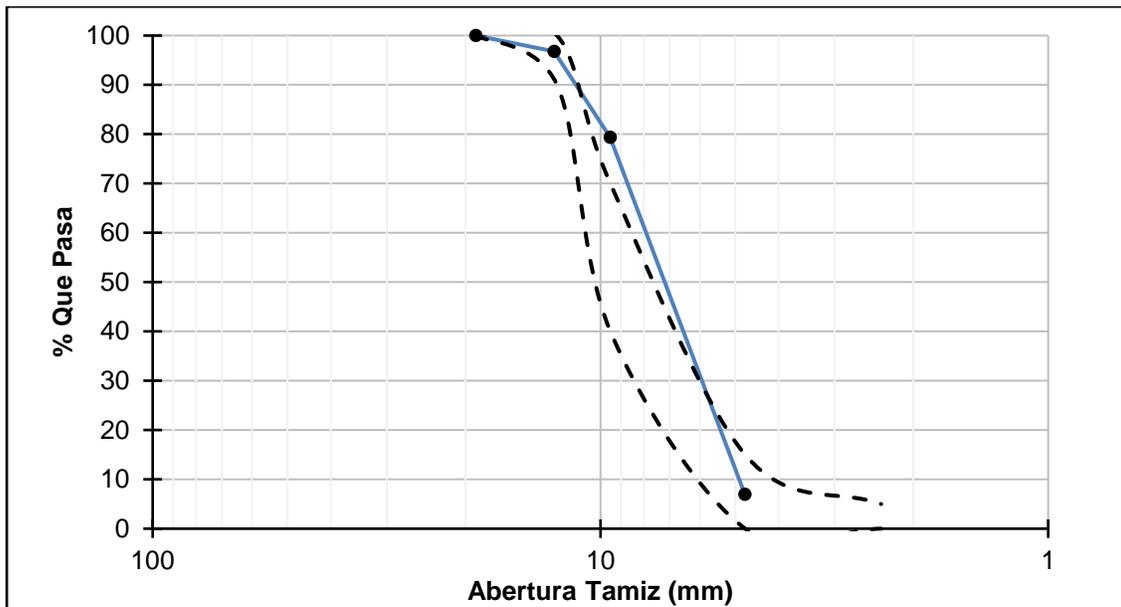
Parámetro	Abr.	Unidad	Valor
Masa unitaria suelta	M <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1293.68
Masa unitaria compacta	M <sub>c</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1355.52
Gravedad específica aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31
Gravedad específica saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42
Absorción	%A	%	4.58
Humedad	%H	%	0.45

La determinación de la curva granulométrica mediante análisis de tamaño por tamizado según la norma NTC 77, se indica a continuación:

**Tabla A-4:** Análisis por tamizado de agregado grueso – Tipo II.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	% Retenido Acumulado	% Pasa
38.1mm (1 ½")	0.0	0.0	0.0%	100.0%
25.4mm (1")	0.0	0.0	0.0%	100.0%
19.0mm (¾")	0.0	0.0	0.0%	100.0%
12.7mm (½")	32.0	32.0	3.2%	96.8%
9.51mm (3/8")	174.0	206.0	20.6%	79.4%
4.76mm (No.4)	724.0	930.0	93.0%	7.0%
Fondo	70.0	1000.0	100.0%	0.0%
<b>Total</b>	1000			

Por lo tanto, el tamaño máximo del agregado nominal (TMN) del agregado grueso Tipo II es 12.7mm (1/2").

**Figura A-2:** Curva granulométrica agregado grueso – Tipo II.

## A.2 Granulometría Agregado Fino

### A.2.1 Agregado Fino – Tipo I (Mezclas M01, M02 y M03)

El agregado fino empleado para la elaboración de las mezclas del presente trabajo fue suministrado y caracterizado en el laboratorio de materiales del Instituto de Extensión e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia a continuación el cálculo de sus propiedades principales según las normas NTC 92, NTC 237 y NTC 1775.

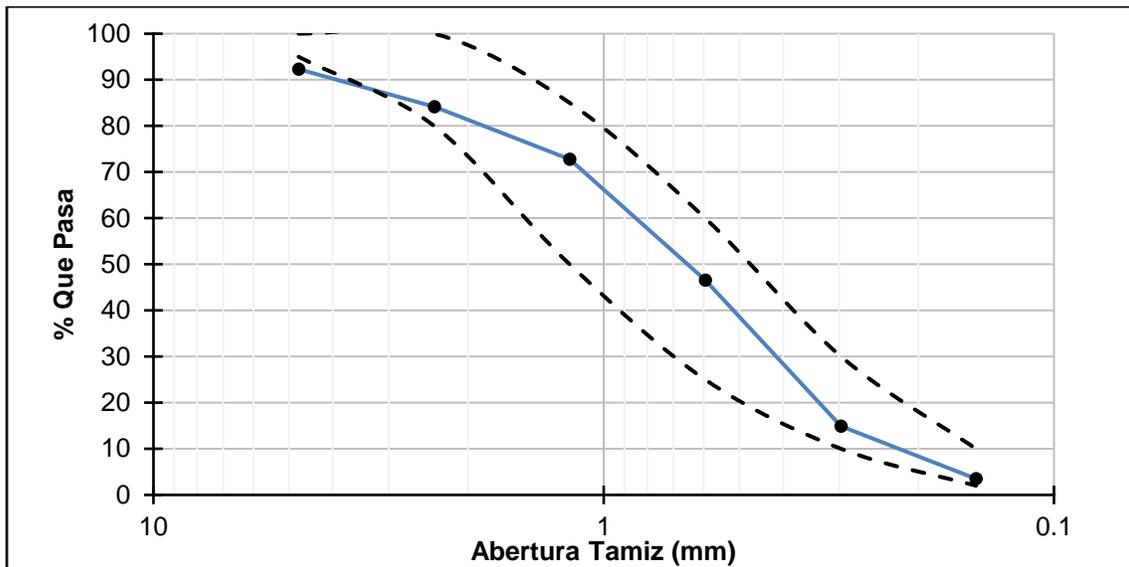
**Tabla A-5:** Resumen propiedades físicas agregado fino - Tipo I.

Parámetro	Abr.	Unidad	Valor
Masa unitaria suelta	M <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1591.05
Masa unitaria compacta	M <sub>c</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1685.69
Gravedad específica aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.54
Gravedad específica saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.51
Absorción	%A	%	0.71
Humedad	%H	%	0.54

La determinación de la curva granulométrica mediante análisis de tamaño por tamizado según la norma NTC 77, se indica a continuación:

**Tabla A-6:** Análisis por tamizado de agregado fino - Tipo I.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	% Retenido Acumulado	% Pasa
4.76mm (No.4)	109.2	109.2	7.7%	92.3%
2.38mm (No.8)	115.2	224.4	15.8%	84.2%
1.19mm (No.16)	161.9	386.3	27.2%	72.8%
0.595µm (No.30)	372.9	759.2	53.4%	46.6%
0.297µm (No.50)	451.8	1211.0	85.1%	14.9%
0.149µm (No.100)	161.4	1372.4	96.5%	3.5%
Fondo	50.1	1422.5	100.0%	0.0%
<b>Total</b>	1422.5			

**Figura A-3:** Curva granulométrica agregado fino - Tipo I.

**A.2.2 Agregado Fino – Tipo II (Mezclas M04, M05 y M06)**

El agregado fino empleado para la elaboración de las mezclas del presente trabajo fue suministrado y caracterizado en el laboratorio de materiales del Instituto de Extensión e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia a continuación el cálculo de sus propiedades principales según las normas NTC 92, NTC 237 y NTC 1775.

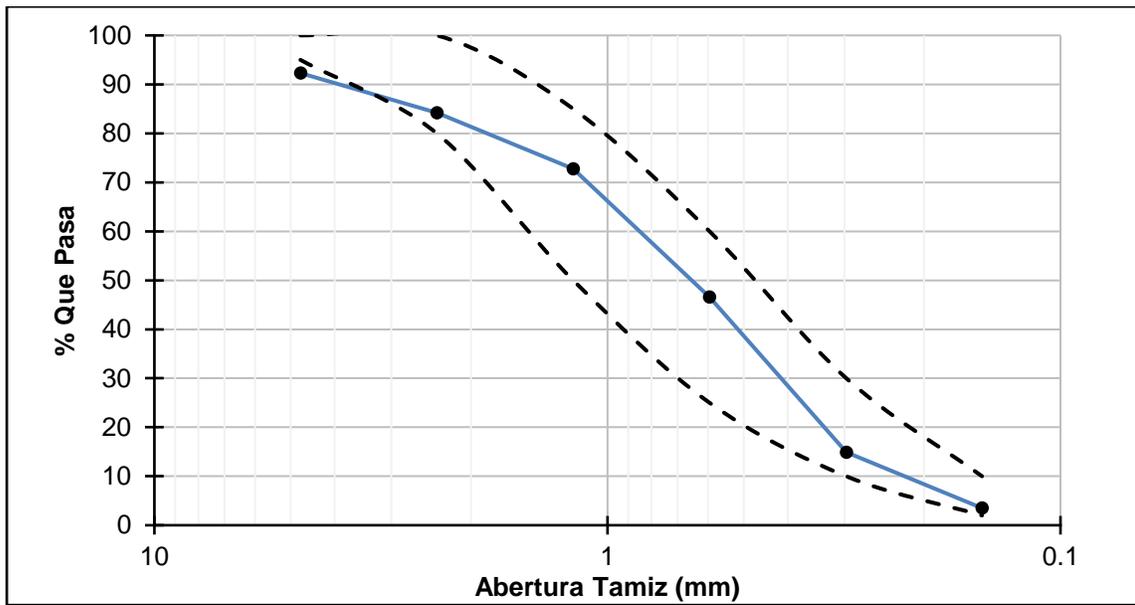
**Tabla A-7:** Resumen propiedades físicas agregado fino - Tipo II.

Parámetro	Abr.	Unidad	Valor
Masa unitaria suelta	M <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1570.77
Masa unitaria compacta	M <sub>c</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1610.50
Gravedad específica aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.48
Gravedad específica saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.47
Absorción	%A	%	0.38
Humedad	%H	%	0.37

La determinación de la curva granulométrica mediante análisis de tamaño por tamizado según la norma NTC 77, se indica a continuación:

**Tabla A-8:** Análisis por tamizado de agregado fino - Tipo II.

Tamiz	Peso Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado (g)	% Retenido Acumulado	% Pasa
4.76mm (No.4)	84.0	84.0	7.0%	93.0%
2.38mm (No.8)	130.0	214.0	17.8%	82.2%
1.19mm (No.16)	168.0	382.0	31.8%	68.2%
0.595µm (No.30)	256.0	638.0	53.1%	46.9%
0.297µm (No.50)	312.0	950.0	79.0%	21.0%
0.149µm (No.100)	156.0	1106.0	92.0%	8.0%
Fondo	96.0	1202.0	100.0%	0.0%
<b>Total</b>	1202.0			

**Figura A-4:** Curva granulométrica agregado fino - Tipo II.

### A.3 Cemento

INFORMACIÓN DEL ENSAYO			
ID Muestra	#	1	
Localización	1	NO SE ESPECIFICA	
Tipo de material	-	CEMENTO	
CONDICIONES AMBIENTALES			
Humedad relativa	%	62	
Temperatura ambiente	°C	23,2	
VOLUMEN APARENTE			
r	Diámetro de la celda	cm	1,276
-	Profundidad de la celda	cm	5,27
-	Longitud del émbolo	cm	3,83
h	Profundidad de la celda- longitud del émbolo	cm	1,44
V	Volumen aparente ocupado por la muestra	cm <sup>3</sup>	1,84
MASA DE LA MUESTRA			
$\rho$	Densidad de la muestra de ensayo	g/cm <sup>3</sup>	2,977
$\epsilon$	Porosidad deseada de la capa de cemento	-	0,504
M	Masa requerida de la muestra	g	2,72
SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LA MUESTRA DE ENSAYO			
Ensayo		1	2
$S_p$	Superficie específica de la muestra de referencia	m <sup>2</sup> /kg	364,4
T	Intervalo de tiempo observado en el descenso del manómetro para la muestra en ensayo	s	123,76
$T_p$	Intervalo de tiempo observado para la muestra patrón empleada en la calibración del aparato	s	142,96
S	Superficie específica de la muestra de ensayo	m <sup>2</sup> /kg	339,0
S	Superficie específica de la muestra de ensayo	cm <sup>2</sup> /g	3390
S	Superficie específica promedio de la muestra de ensayo	m <sup>2</sup> /kg	339,0
S	Superficie específica promedio de la muestra de ensayo	cm <sup>2</sup> /g	3390
CONDICIONES AMBIENTALES			
Humedad relativa	%	46	
Temperatura ambiente	°C	19,8	
Método empleado	-	A	
Tiempo (min)	Penetración (mm)		
105	38		
120	37		
135	35		
150	33		
165	30		
180	26		
195	21		
210	15		
225	5		
240	1		
255	0		
270	0		
285	0		
300	0		
315	0		
Penetración (mm)	Tiempo (min)		
40	100		
38	120		
37	140		
35	160		
33	180		
30	200		
26	220		
21	240		
15	260		
5	280		
1	300		
0	320		
0	340		
0	360		
0	380		
0	400		
0	420		
0	440		
0	460		
0	480		
0	500		
0	520		
0	540		
0	560		
0	580		
0	600		
0	620		
0	640		
0	660		
0	680		
0	700		
0	720		
0	740		
0	760		
0	780		
0	800		
0	820		
0	840		
0	860		
0	880		
0	900		
0	920		
0	940		
0	960		
0	980		
0	1000		
0	1020		
0	1040		
0	1060		
0	1080		
0	1100		
0	1120		
0	1140		
0	1160		
0	1180		
0	1200		
0	1220		
0	1240		
0	1260		
0	1280		
0	1300		
0	1320		
0	1340		
0	1360		
0	1380		
0	1400		
0	1420		
0	1440		
0	1460		
0	1480		
0	1500		
0	1520		
0	1540		
0	1560		
0	1580		
0	1600		
0	1620		
0	1640		
0	1660		
0	1680		
0	1700		
0	1720		
0	1740		
0	1760		
0	1780		
0	1800		
0	1820		
0	1840		
0	1860		
0	1880		
0	1900		
0	1920		
0	1940		
0	1960		
0	1980		
0	2000		
0	2020		
0	2040		
0	2060		
0	2080		
0	2100		
0	2120		
0	2140		
0	2160		
0	2180		
0	2200		
0	2220		
0	2240		
0	2260		
0	2280		
0	2300		
0	2320		
0	2340		
0	2360		
0	2380		
0	2400		
0	2420		
0	2440		
0	2460		
0	2480		
0	2500		
0	2520		
0	2540		
0	2560		
0	2580		
0	2600		
0	2620		
0	2640		
0	2660		
0	2680		
0	2700		
0	2720		
0	2740		
0	2760		
0	2780		
0	2800		
0	2820		
0	2840		
0	2860		
0	2880		
0	2900		
0	2920		
0	2940		
0	2960		
0	2980		
0	3000		
0	3020		
0	3040		
0	3060		
0	3080		
0	3100		
0	3120		
0	3140		
0	3160		
0	3180		
0	3200		
0	3220		
0	3240		
0	3260		
0	3280		
0	3300		
0	3320		
0	3340		
0	3360		
0	3380		
0	3400		
0	3420		
0	3440		
0	3460		
0	3480		
0	3500		
0	3520		
0	3540		
0	3560		
0	3580		
0	3600		
0	3620		
0	3640		
0	3660		
0	3680		
0	3700		
0	3720		
0	3740		
0	3760		
0	3780		
0	3800		
0	3820		
0	3840		
0	3860		
0	3880		
0	3900		
0	3920		
0	3940		
0	3960		
0	3980		
0	4000		
0	4020		
0	4040		
0	4060		
0	4080		
0	4100		
0	4120		
0	4140		
0	4160		
0	4180		
0	4200		
0	4220		
0	4240		
0	4260		
0	4280		
0	4300		
0	4320		
0	4340		
0	4360		
0	4380		
0	4400		
0	4420		
0	4440		
0	4460		
0	4480		
0	4500		
0	4520		
0	4540		
0	4560		
0	4580		
0	4600		
0	4620		
0	4640		
0	4660		
0	4680		
0	4700		
0	4720		
0	4740		
0	4760		
0	4780		
0	4800		
0	4820		
0	4840		
0	4860		
0	4880		
0	4900		
0	4920		
0	4940		
0	4960		
0	4980		
0	5000		
0	5020		
0	5040		
0	5060		
0	5080		
0	5100		
0	5120		
0	5140		
0	5160		
0	5180		
0	5200		
0	5220		
0	5240		
0	5260		
0	5280		
0	5300		
0	5320		
0	5340		
0	5360		
0	5380		
0	5400		
0	5420		
0	5440		
0	5460		
0	5480		
0	5500		
0	5520		
0	5540		
0	5560		
0	5580		
0	5600		
0	5620		
0	5640		
0	5660		
0	5680		
0	5700		
0	5720		
0	5740		
0	5760		
0	5780		
0	5800		
0	5820		
0	5840		
0	5860		
0	5880		
0	5900		
0	5920		
0	5940		
0	5960		
0	5980		
0	6000		
0	6020		
0	6040		
0	6060		
0	6080		
0	6100		
0	6120		
0	6140		
0	6160		
0	6180		
0	6200		
0	6220		
0	6240		
0	6260		
0	6280		
0	6300		
0	6320		
0	6340		
0	6360		
0	6380		
0	6400		
0	6420		
0	6440		
0	6460		
0	6480		
0	6500		
0	6520		
0	6540		
0	6560		
0	6580		
0	6600		
0	6620		

INFORMACIÓN DEL ENSAYO		
ID Muestra	#	1
Localización	1	NO SE ESPECIFICA
Tipo de material	-	CEMENTO
CONDICIONES AMBIENTALES		
Humedad relativa	%	61
Temperatura ambiente	°C	22,4
Frasco de Le Chatelier	No	EQ-0304
Masa del cemento	g	64,0
Lectura inicial en el frasco de Le Chatelier	ml	0,2
Lectura final en el frasco de Le Chatelier	ml	21,7
Volumen desplazado	ml	21,5
Densidad del cemento ( $\rho$ )	(g/cm <sup>3</sup> )	2,977
Gravedad específica	-	2,977

## A.4 Fibras de Polipropileno (PP) – Hoja de Datos

The Euclid Chemical Company

# TUF-STRAND SF

MACRO SYNTHETIC FIBRE



EUCLID CHEMICAL

FIBER PRODUCTS

### DESCRIPTION

TUF-STRAND SF is a patented polypropylene / polyethylene macro synthetic fibre successfully used to replace steel fibres, welded wire mesh and conventional reinforcing bars in a wide variety of applications. TUF-STRAND SF fibres comply with ASTM C1116, Standard Specification for Fibre Reinforced Concrete and Shotcrete, and are specifically designed to provide equivalent tensile and bending resistance to conventional reinforcement requirements. Concrete reinforced with TUF-STRAND SF will have three-dimensional reinforcing with enhanced flexural toughness, impact and abrasion resistance and will also help mitigate the formation of plastic shrinkage cracking in concrete. Dosage rates will vary depending upon the reinforcing requirements and can range from 1.8 kg/m<sup>3</sup> to 12 kg/m<sup>3</sup>. TUF-STRAND SF synthetic macro-fibres comply with applicable portions of the International Code Council (ICC) Acceptance Criteria AC308 for synthetic fibres, are UL certified for composite metal deck construction and are recognised within ACI 308 and SDI/ANSI-C1.0 as an alternative reinforcement.

### PRIMARY APPLICATIONS

- Slab on Grade and elevated construction (distribution centers, warehouses, etc.)
- Thin walled pre-cast (septic tanks, vaults, walls, etc.)
- Shotcrete for tunnel linings, pool construction and slope stabilisation
- Pavements and white-toppings
- Concrete topping on composite deck construction, on metal deck, or on hollow-core slab
- Residential Walls

### FEATURES / BENEFITS

- Equivalent strengths to Welded Wire Mesh (WWM) and rebar provided by engineering calculations
- Controls and mitigates plastic shrinkage cracking and reduces segregation and bleed-water
- Provides three-dimensional reinforcement against micro and macro-cracking
- Reduces equipment wear, fibre rebound and increases build-up thickness compared to steel fibres for shotcrete applications
- Increases overall durability, fatigue resistance and flexural toughness
- Reduction of in-place cost versus wire mesh for temperature / shrinkage crack control
- Easily added to concrete mixture at any time prior to placement
- Tested in accordance with ASTM C 1399, C 1550, C 1609
- Applicable for design by ACI 308 R-10
- Certified for use by UL/ULC for D900 and F900 Series metal deck assemblies as alternate to WF (CBXQ.13773)

### TECHNICAL

#### Typical Engineering Data

Material	polypropylene/polyethylene blend	Melt Point	160°C
Typical dosage rates	1.8 to 12 kg/m <sup>3</sup>	Electrical & Thermal Conductivity	low
Aspect Ratio	74	Available lengths	51 mm
Tensile Strength	600 to 650 MPa	Water Absorption	negligible
Modulus of Elasticity (EN 14889.2)	9.5 GPa	Acid and Alkali Resistance	excellent
Specific Gravity	0.92	Colour	white

TUF-STRAND SF

MASTER FORMAT #:  
03 24 00

**PACKAGING**

TUF-STRAND SF fibres are packaged in 1.36 kg, 1.81 kg and 2.27 kg water soluble bags.

**SHELF LIFE**

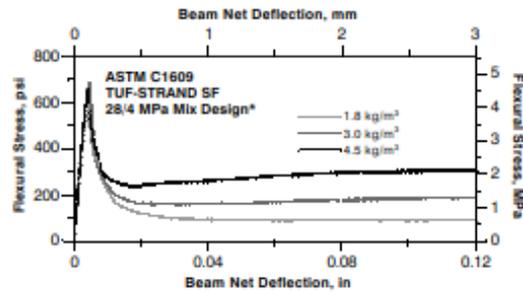
3 years in original, unopened package.

**DIRECTIONS FOR USE**

TUF-STRAND SF fibres can be added to the concrete mixture at any time prior to placement of the concrete. It is generally recommended to add any fibre material at the ready-mix concrete plant during batching. Fibres must be mixed with concrete for a minimum of three (3) to five (5) minutes at maximum mixing speed, depending on the mixer type, to ensure complete dispersion and uniformity. When adding 1.8 to 3 kg/m<sup>3</sup>, a slump loss of up to 50 mm can be expected for a typical ready-mix concrete design. For dosages of 4 to 7 kg/m<sup>3</sup>, a slump loss of 75 to 125 mm can be expected. The use of water reducers and/or superplasticisers, such as Eucon 1037, the Eucon series or the Plastol series of admixtures may be necessary to maintain desired workability.

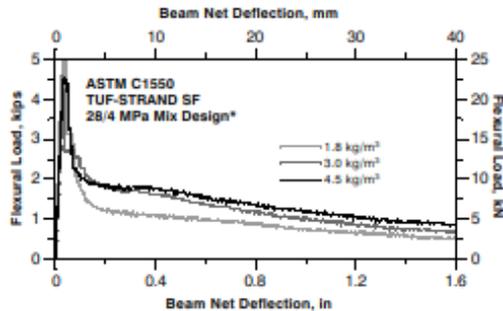
Add other admixtures independently from fibre addition. TUF-STRAND SF is compatible with all Euclid Chemical admixtures. When used properly, and placed in a concrete mix of sufficient workability, the fibres will not adversely alter the compressive or flexural strength of concrete or shotcrete.

Fibre-reinforced concrete (FRC) is characterised by standard test methods such as ASTM C1399, C1609, and C1550 or RILEM TC162 (EN14651). The flexural residual strength of FRC is measured using these beam tests and is used for design purposes with proper conversion factors. Typical test results for ASTM C1609 (FRC beam) and C1550 (FRC round panel) are shown for TUF-STRAND SF macro synthetic fibre tested at different dosage rates. These test results could vary with mix design and curing conditions.



Dosage kg/m <sup>3</sup>	f <sub>cu</sub> MPa	R <sub>cu</sub> %
1.8	0.9	22±3
3.0	1.4	30±2
4.5	2.0	44±4

(Typical Data)



Dosage kg/m <sup>3</sup>	Energy (J) at Deflection (mm)				
	5	10	20	30	40
1.8	43	67	109	144	171
3.0	48	83	138	178	208
4.5	58	107	190	254	302

(Typical Data)

\*Compressive Strength = 28 MPa (Cylindrical)  
Flexural Strength = 4 MPa

Rev: 29/03/21

**DISCLAIMER:** Tremco CPG Malaysia's products are guaranteed against defective materials and manufacture and are sold subject to its standard Terms and Conditions of Sale, copies of which can be obtained on request. Any suggested practices or installation specifications for the composite system (as opposed to individual product performance specifications) included in this communication (or any other) from Tremco CPG Malaysia Sdn Bhd constitute potential options only and do not constitute nor replace professional advice in such regard. Tremco CPG Malaysia Sdn Bhd recommends any customer seek independent advice from a qualified consultant prior to reaching any decision on design, installation or otherwise.

**CLEAN-UP**

Loose fibre material may be disposed in proper receptacles for refuse. Finishing equipment with fibres embedded in concrete should be thoroughly cleaned.

**PRECAUTIONS/CONSIDERATIONS**

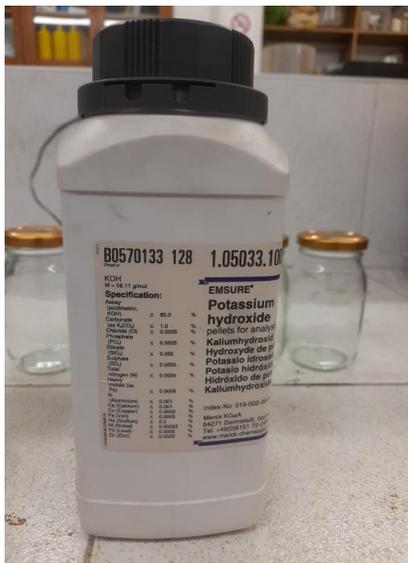
- Use of fibres may cause an apparent loss in measured slump of concrete. This may be offset with the use of a water reducing admixture if necessary.
- Fibres should never be added to a "zero-slump" concrete. Ensure a minimum concrete slump of 80 mm prior to addition of any fibre material. Fibres may also be added in loose form to aggregate charging devices.
- In all cases, consult the Safety Data Sheet before use.

Rev: 29/03/21

---

**DISCLAIMER:** Tremco CPG Malaysia's products are guaranteed against defective materials and manufacture and are sold subject to its standard Terms and Conditions of Sale, copies of which can be obtained on request. Any suggested practices or installation specifications for the composite system (as opposed to individual product performance specifications) included in this communication (or any other) from Tremco CPG Malaysia Sdn Bhd constitute potential options only and do not constitute nor replace professional advice in such regard. Tremco CPG Malaysia Sdn Bhd recommends any customer seek independent advice from a qualified consultant prior to reaching any decision on design, installation or otherwise.

## A.5 Potassium Hydroxide Pellets for Analysis EMSURE® - Especificación



### Specification

1.05033.1000 Potassium hydroxide pellets for analysis EMSURE®

	Specification	
Assay (acidimetric, KOH)	≥ 85.0	%
Carbonate (as K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	≤ 1.0	%
Chloride (Cl)	≤ 0.01	%
Phosphate (PO <sub>4</sub> )	≤ 0.0005	%
Silicate (SiO <sub>2</sub> )	≤ 0.005	%
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	≤ 0.0005	%
Total nitrogen (N)	≤ 0.0005	%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.0005	%
Al (Aluminium)	≤ 0.001	%
Ca (Calcium)	≤ 0.001	%
Cu (Copper)	≤ 0.0002	%
Fe (Iron)	≤ 0.0005	%
Na (Sodium)	≤ 0.5	%
Ni (Nickel)	≤ 0.0005	%
Pb (Lead)	≤ 0.0005	%
Zn (Zinc)	≤ 0.0025	%

Dr. Dimitrij Ryvlin  
Responsible laboratory manager quality control

This document has been produced electronically and is valid without a signature.



# A.7 Superplastificante MasterGlenium7975 - Hoja de Datos

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD** **MBOC GROUP**

**MasterGlenium 7975**

Versión: 1.0    Fecha de revisión: 13.08.2020    Número SDS: 0603000612    Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020

**SECCIÓN 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA**

Nombre del producto: MasterGlenium 7975

Información sobre el fabricante o el proveedor:  
 Compañía: Master Builders Solutions S.A.S  
 Dirección: Carrera 23 No. 164-83, Bogotá, Colombia  
 ChemTel: +1-813-244-0266  
 Teléfono de emergencia: CISTROQUIM, 01000316012

Uso recomendado del producto químico y restricciones de uso:  
 Uso recomendado: Producto para lo servicio de la construcción

**SECCIÓN 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS**

Clasificación GHS: Peligros críticos: Categoría 2  
 Irritación ocular: Categoría 2A

Elementos de etiquetado GHS:  
 Pictogramas de peligro: 

Palabra de advertencia: Atención

Indicaciones de peligro:  
 H315 Provoca irritación cutánea.  
 H319 Provoca irritación ocular grave.

Consejos de prudencia:  
 Prevenir: P204 Lavarse la piel inmediatamente tras la manipulación.  
 P280 Llevar guantes/lentes de protección para los ojos o el cara.  
 Intervención: P302 + P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con abundante agua.  
 P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y seguir frotando con facilidad. Presentar al médico.  
 P332 + P313 En caso de irritación cutánea: Consultar a un médico.

1 / 9

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD** **MBOC GROUP**

**MasterGlenium 7975**

Versión: 1.0    Fecha de revisión: 13.08.2020    Número SDS: 0603000612    Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020

P337 + P313 Si persiste la irritación ojar: Consultar a un médico.  
 P302 + P352 Quitar los guantes contaminados y lavarlos antes de volver a usarlos.

Otros peligros que no dan lugar a la clasificación:  
 Si es aplicable, se facilita en esta sección la información sobre otros peligros que no dan lugar a la clasificación pero que puedan contribuir al peligro global de la sustancia o mezcla.

**SECCIÓN 3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES**

Nombre químico	Nº. CAS	Concentración (% en peso)
Polipropileno sólido, polímero with etileno, sodio, sulf	2799-66-3	>= 30 - 50

**SECCIÓN 4. PRIMEROS AUXILIOS**

Recomendaciones generales: Lo primero que se debe hacer es protegerse. Cambiar inmediatamente la ropa contaminada.

Si es inhalado: Reposo, respirar aire fresco. Si los síntomas persisten, consultar al médico.

En caso de contacto con la piel: En caso de contacto con la piel, lavarse inmediatamente con abundante agua y jabón. No debe usarse disolventes orgánicos bajo ninguna circunstancia. Si la irritación persiste, acudir al médico.

En caso de contacto con los ojos: Lavar abundantemente los ojos con agua corriente durante 15 minutos y con los párpados abiertos, con el propósito de eludir el riesgo.

Por ingestión: Lavar inmediatamente la boca y beber inmediatamente 200-300 ml de agua, beber ayuda médica. No inducir el vómito a menos que así lo indique un médico de control de envenenamiento o un médico.

Principales síntomas y efectos, agudos y retardados: Ninguna conocida.

**SECCIÓN 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**

Medios de extinción apropiados: Extintor, Spray de agua, Fuego seco, Oxicloro de carbono (CO2), Oxicloro de agua.

Medios de extinción no apropiados: Productos de combustión peligrosos.

Métodos específicos de extinción: El riesgo depende de las sustancias que se están quemando.

2 / 9

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD** **MBOC GROUP**

**MasterGlenium 7975**

Versión: 1.0    Fecha de revisión: 13.08.2020    Número SDS: 0603000612    Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020

Uso: y de las condiciones del incendio. Refrigerar con agua los recipientes amenazados por el calor. Asumir inmediatamente el agua de extinción contaminada, si no puede ser vertida al drenaje. No se debe utilizar el agua de extinción contaminada. El agua de extinción contaminada debe ser eliminada respetando las regulaciones locales vigentes. Protegerse con un equipo respiratorio autónomo.

**SECCIÓN 6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL**

Precauciones personales, equipos de protección personal y procedimientos de emergencia:  
 Evitar respirar el polvo o la neblina o gas (la niebla/ las vapores/ el aerosol). Usar protección para los ojos/ cara. Utilizar ropa de protección personal. Las medidas de protección habituales durante la manipulación de sustancias químicas de la construcción deben ser hechas en consideración.

Precauciones relativas al medio ambiente:  
 Retener las aguas contaminadas, incluida el agua de lavado de recipientes, caso de estar contaminada. Evitar el vertido en el alcantarillado, aguas superficiales o subterráneas.

Métodos y material de contención y de limpieza:  
 Recoger con maquinaria adecuada y eliminar. Filtrar el material recogido teniendo en consideración las disposiciones locales.

**SECCIÓN 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO**

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión:  
 El producto no es autoinflamable, no combustible y no existe peligro de explosión.

Consejos para una manipulación segura:  
 Evitar la inhalación de polvo/neblina/vapores. Evitar el contacto con la piel. Asegurarse una ventilación apropiada. No se recomienda ninguna medida especial, si se utiliza el producto adecuadamente.

Información complementaria sobre las condiciones de almacenamiento:  
 Conservar únicamente en el recipiente de origen, en lugar fresco y bien ventilado y lejos de fuente de ignición, calor o llama. Proteger de la radiación solar directa.

**SECCIÓN 8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN INDIVIDUAL**

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional:  
 No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

3 / 9

**FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD** **MBOC GROUP**

**MasterGlenium 7975**

Versión: 1.0    Fecha de revisión: 13.08.2020    Número SDS: 0603000612    Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020

Protección personal:  
 Protección respiratoria: Protección de las vías respiratorias en caso de ventilación insuficiente. Mascarilla contaminada para gases orgánicos, inorgánicos, ácidos, reactivos y aerosoles/vapor (tip. e) EN 14397, Tipo ABEK1.

Protección de los brazos:  
 Observados: guantes impermeables gruesos de goma sintética. Debido a la gran variedad de tipos, se debe tener en cuenta el manual de instrucciones del fabricante (guantes protectores con protección lateral) (gafas con montura) (EN 166).

Protección de los ojos:  
 Protección de la piel y del cuerpo:  
 Medidas de protección: Protección corporal debe ser seleccionada basándose en los niveles de exposición y de acuerdo a la actividad. No respirar polvo/vapores/aerosoles. Evitar el contacto con la piel, ojos y vestimenta. Evitar la exposición - se debe usar protección especial antes del uso. Las medidas de protección habituales durante la manipulación de sustancias químicas de la construcción deben ser hechas en consideración. Se recomienda llevar ropa de trabajo cerrada. Mientras se utiliza, prohibido comer, beber o fumar. Lavarse las manos y/o cara antes de las pausas y al finalizar el trabajo. Lavar/limpiar la piel tras finalizar el trabajo. Los guantes se deben cambiar regularmente y antes de comer. Debita si es necesario lavar en caso de presentar pequeños agujeros.

Medidas de higiene:  
 No comer ni beber durante su utilización.

**SECCIÓN 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

Aspecto	Líquido
Color	Ambar a marrón
Olor	característico
Unidad objetivo	sin datos disponibles
pH	5.5
Punto de fusión	No aplicable
Punto de solidificación	No aplicable
Punto de ebullición	> 200 °C
Densidad	1,00 g/cm³ (20 °C)
Solubilidad: Solubilidad en agua	No determinada

4 / 9

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD		MBCG GROUP	
<b>MasterGlenium 7975</b>			
Versión: 1.0	Fecha de revisión: 13.08.2020	Número SDS: 9000000812	Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020
Coeficiente de reparto incoherencias:		No es aplicable para masas.	
Temperatura de descomposición:		Ninguna descomposición, si se almacena y aplica como se indica en el presente.	
<b>SECCIÓN 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD</b>			
Reactividad:	Ninguna reacción peligrosa, si se tienen en consideración las recomendaciones sobre almacenamiento y manipulación.		
Estabilidad química:	El producto es estable si se tiene en consideración las recomendaciones sobre almacenamiento y manipulación.		
Potencial de reacciones peligrosas:	El producto es estable si se tiene en consideración las recomendaciones sobre almacenamiento y manipulación.		
Condiciones que deben evitarse: Materiales incompatibles:	Ver FDS capítulo 7 - Manipulación y almacenamiento. Ácidos fuertes Sales fuertes Agentes oxidantes fuertes Agentes reductores fuertes		
Productos de descomposición peligrosos:	No se tienen en consideración los productos de descomposición, si se tienen en consideración las recomendaciones sobre almacenamiento y manipulación.		
<b>SECCIÓN 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA</b>			
<b>Toxicidad aguda</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Corrosión o irritación cutáneas</b>			
Proceso irritación cutánea:			
Lesiones o irritación ocular graves:			
Proceso irritación ocular grave:			
<b>Sensibilización respiratoria o cutánea</b>			
Sensibilización cutánea:			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Sensibilización respiratoria</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Mutagenicidad en células germinales</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Carcinogenicidad</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Toxicidad para la reproducción</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Toxicidad específica en determinados órganos (atóx) - exposiciones únicas</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
5/9			

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD		MBCG GROUP	
<b>MasterGlenium 7975</b>			
Versión: 1.0	Fecha de revisión: 13.08.2020	Número SDS: 9000000812	Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020
<b>Toxicidad específica en determinados órganos (atóx) - exposiciones repetidas</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Toxicidad por inhalación</b>			
No está clasificado en base a la información disponible.			
<b>Otros datos</b>			
<b>Productos:</b>			
Observaciones:	No se han conocido ni esperados daños para la salud en condiciones normales de uso. El producto no ha sido ensayado. Los indicadores sobre toxicología han sido calculados a partir de las propiedades de sus componentes individuales.		
<b>SECCIÓN 12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA</b>			
<b>Ecotoxicidad:</b>			
<b>Productos:</b>			
Evaluación Ecotoxicológica:	Este producto no tiene efectos ecotoxicológicos conocidos.		
Toxicidad acuática crónica:	Este producto no tiene efectos ecotoxicológicos conocidos.		
<b>Persistencia y degradabilidad</b>			
<b>Productos:</b>			
Biodegradabilidad:	Observaciones: Teniendo en cuenta las propiedades de sus componentes, se afirma que el producto no es altamente biodegradable de acuerdo con la clasificación OCDE.		
<b>Potencial de bioacumulación</b>			
Sin datos disponibles.			
<b>Movilidad en el suelo</b>			
Sin datos disponibles.			
<b>Otros efectos adversos</b>			
<b>Productos:</b>			
Información ecológica complementaria:	No permite el vertido de forma incontrolada en el medio ambiente. El producto no ha sido ensayado. Los indicadores sobre toxicología han sido calculados a partir de las propiedades de sus componentes individuales.		
6/9			

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD		MBCG GROUP	
<b>MasterGlenium 7975</b>			
Versión: 1.0	Fecha de revisión: 13.08.2020	Número SDS: 9000000812	Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020
<b>SECCIÓN 13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN</b>			
<b>Métodos de eliminación:</b>			
Residuos:	Observar la legislación nacional y local. El código de residuos de acuerdo con el Catálogo Europeo de Residuos (EWC) se debe especificar en cooperación con el fabricante y las autoridades. Los residuos deben ser eliminados de la misma forma que la sustancia/producto.		
Envases contaminados:	Los envases contaminados deben ser vaciados de forma segura de manera que, después de una limpieza a fondo, pueden ser reutilizados. Envases no reutilizables, deben ser eliminados como el producto.		
<b>SECCIÓN 14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE</b>			
<b>Regulaciones internacionales</b>			
<b>IMDTS</b>			
No está clasificado como producto peligroso.			
<b>ATA/ADR</b>			
No está clasificado como producto peligroso.			
<b>Código-IMDG</b>			
No está clasificado como producto peligroso.			
Transporte a granel de acuerdo con las Instrucciones de la OMI			
No aplicable al producto suministrado.			
<b>SECCIÓN 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA</b>			
<b>Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla</b>			
En este subapartado se encuentra aquella información reglamentaria aplicable que no está mencionada en otros apartados de esta Ficha de datos de seguridad.			
<b>Regulaciones internacionales</b>			
<b>SECCIÓN 16. OTRA INFORMACIÓN</b>			
<b>Otros datos</b>			
Otra información:	No hay datos disponibles.		
7/9			

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD		MBCG GROUP	
<b>MasterGlenium 7975</b>			
Versión: 1.0	Fecha de revisión: 13.08.2020	Número SDS: 9000000812	Fecha de la última expedición: Fecha de la primera expedición: 13.08.2020
<b>NPA:</b>			
		<b>HMSB (H):</b> 	
Las clasificaciones del H&B (Sistema de Identificación de Mezclas Peligrosas) se basan en una escala de clasificación de 1 a 4, donde 1 representa menor o peligro mínimo y 4 representa mayor o peligro significativo. El símbolo "X" representa un peligro crónico, mientras que el símbolo "N" representa la ausencia de un peligro crónico.			
<b>Título completo de otros abreviados:</b>			
<p>AEC - Inventario, Análisis de Sustancias Químicas; ANTT - Agencia Nacional de Transporte Terrestre de Brasil; AOTN - Sociedad Latinoamericana para la Prueba de Materiales; BSI - Buro español; CBR - Carotidograma, mutágeno o tóxico para la reproducción; DIN - Norma del Instituto Alemán para la Normalización; DNE - Lista Nacional de Sustancias (Canada); ECU - Concentración asociada con respuesta 4%; ECU - Tasa de respuesta asociada con respuesta 4%; ECU - Procedimiento de emergencia; ENCS - Sustancias Químicas Esenciales y Reservas (Japan); ECU - Concentración asociada con respuesta de base de clasificación 4%; ECU - Tasa de respuesta ante emergencia; GHS - Sistema Globalmente Armonizado; GEP - Guías prácticas de identificación; IARC - Agencia Internacional para la investigación del cáncer; IATA - Asociación Internacional de Transporte Aéreo; IBC - Código Internacional para la construcción y equipamiento de Embarcaciones que transportan químicos peligrosos a granel; ICH - Comité Europeo Internacional de Normalización; ICAO - Organización Internacional de Aviación Civil; IECSC - Inventario de Sustancias Químicas en China; IMDG - Código Marítimo Internacional de Mezclas Peligrosas; IMO - Organización Marítima Internacional; IOM - Ley de Seguridad e Higiene Industrial (Japan); ISO - Organización Internacional para la Normalización; KECI - Inventario de Químicos Esenciales de Corea; LDC - Concentración total para 50% de una población de aves; LDC - Dosis total para 50% de una población de granos (Dosis total mediana); MARPOL - Convenio Internacional para prevenir la contaminación en el mar por los buques; n.a. - N.E.P. - No especificado en otra parte; NCh - Norma chilena; NORMEC - Comisión de efectos tóxicos no observables; NIOSH - Nivel de efecto (adverso) no observable; NIOSH - Tasa de carga de efecto no observable; NOM - Norma Oficial Mexicana; NTP - Programa Toxicológico Nacional; NDNC - Inventario de Químicos de Nueva Zelandia; OECD - Organismo para la Cooperación y el Desarrollo Económico; OSHA - Oficina para la Seguridad y Salud Ocupacional; OSHA - Sustancias peligrosas; OSHA/NIOSH - Inventario Federal de Químicos y Sustancias Químicas; OSHA - Relación estructura-actividad (quantitative); REACH - Reglamento (CE) No</p>			
8/9			

## FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

MBC GROUP

## MasterGlenium 7975

Versión:	Fecha de revisión:	Número SDS:	Fecha de la última actualización - Fecha de la primera expedición:
1.0	13.08.2020	90000908012	13.08.2020

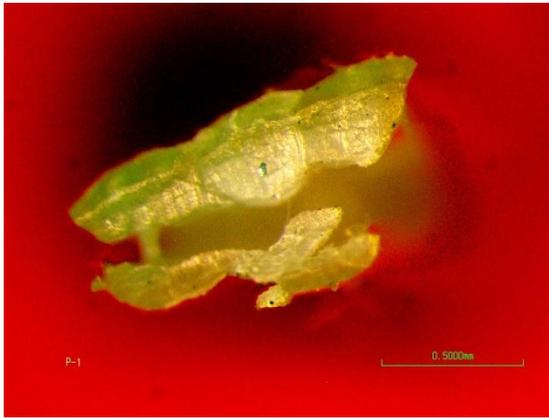
1607/2006 del Parlamento y Consejo Europeo con respecto al registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias; (SGH) - Temperatura de descomposición autoacelerada; SDS - Ficha de datos de seguridad; TCS - Tratamiento de Sustancias Químicas en Tránsito; TDG - Transporte de mercancías peligrosas; TSCA - Ley para el Control de Sustancias Químicas (Estados Unidos); UN - Naciones Unidas; UNRTDG - Recomendaciones para el Transporte de Mercancías Peligrosas de las Naciones Unidas; PFD - Muy corrosiva y muy tóxica al medio ambiente; WHAS - Sistema de Información de Materiales Peligrosos en el Sitio de Trabajo

La información proporcionada en esta Ficha de Datos de Seguridad, no le debe ser tomada como una garantía o especificación de calidad. La información se refiere únicamente al material especificado, y no puede ser válida para dicho material, usado en combinación con otros materiales o en cualquier proceso o método que sea indicado en el texto.

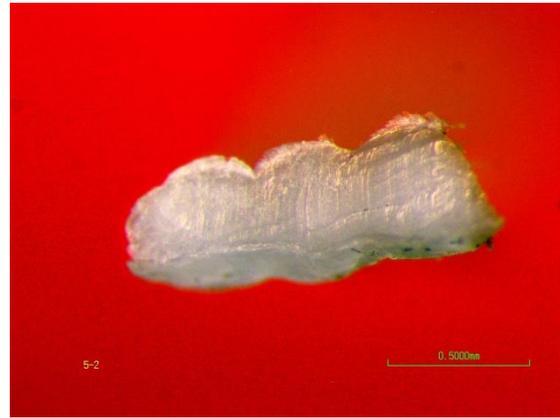
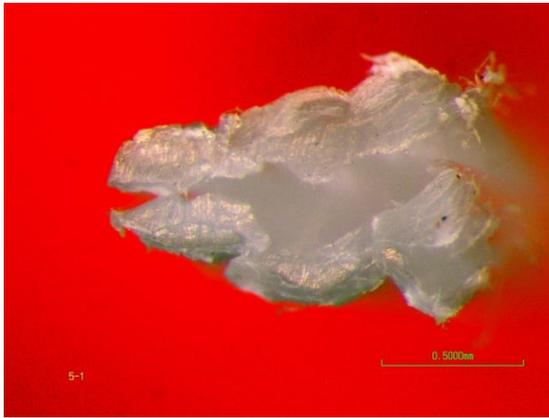
CO/ES



## **Anexo B: Imágenes Estereomicroscopio**











## **Anexo C: Diseño de Mezcla**

Para el desarrollo de este Trabajo Final de maestría se fabricaron seis mezclas de concreto (M01, M02, M03, M04, M05 y M06), dos de concreto simple (M01 y M04) y cuatro más de concreto con fibras de marca TOXEMENT referencia TUF-STRAND SF, en diferentes dosificaciones  $1.8\text{kg/m}^3$ ,  $6.0\text{kg/m}^3$ ,  $4.5\text{kg/m}^3$  y  $7.5\text{kg/m}^3$  (M02, M03, M05 y M06 respectivamente). Las fibras usadas son una mezcla entre polipropileno y polietileno (ver anexo A.4).

En el diseño de las mezclas se siguieron los procedimientos estipulados en el estándar para selección y proporcionamiento del concreto (ACI Committee 221.1, 1991) "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavweight and Mass Concrete" y se tomó la granulometría y propiedades físicas de los agregados grueso y fino presentada en los anexos A.1 y A.2 respectivamente y la caracterización del cemento usado en el anexo A.3.

Adicional a lo anterior, es necesario tener en cuenta que para concreto con fibras y para el caso específico de mezclas con fibras macrosintéticas el proporcionamiento de los agregados es similar a como se indica para fibras metálicas (ACI Committee 544.3R, 2008), esta guía del comité 544 del ACI especifica que para una adición de fibras mayor a 0.5% del volumen de la mezcla se deben realizar ajustes en la relación de agregado fino-grueso y se debe optar por el uso de aditivos reductores de agua, esto es debido a que la trabajabilidad de la mezcla (propiedad del concreto en estado fresco) se ve directamente afectada por la adición de fibras (ACI Committee 544.2R, 2017).

Se consideraron igualmente las recomendaciones del proveedor de la fibra con respecto al asentamiento promedio, la relación w/c y además con el fin de medir la influencia del tamaño del agregado se realizaron dos tipos de mezcla base una para agregado de tamaño TMN 19mm (M01, M02 y M03) y otra para agregado TMN 12.7mm (M04, M05 y M06) las cantidades de agregados se mantuvieron constantes, por tipo de mezcla variando únicamente el contenido de adición de fibra, para mejorar la trabajabilidad y lograr el revenimiento estimado fue necesario la adición de superplastificante o fluidificante (ver anexo A.7) su cantidad se calculó entre el 0.25% al 0.35% del peso total de cemento.

En las siguientes secciones se resume el diseño para cada una de las mezclas y se indica la dosificación por volumen absoluto y por peso. El día de mezclado fue necesario realizar ajuste en el contenido de agua de mezclado (como se indica en los siguientes anexos), calculado previamente según tabla 6.3.3 del (ACI Committee 221.1, 1991).

# C.1 Diseño de Mezcla M01

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</p> <p>Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas</p> <p><b>Diseño de Mezcla</b> M01  <b>Cantidad de fibra</b> 0 kg/m<sup>3</sup>  <b>Fecha</b> 13 de diciembre 2021</p>	<p><b>DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO</b></p> <p>Tabla C-1 <i>Dosificación por volumen absoluto - M01</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Específico (g/cm<sup>3</sup>)</th> <th>Peso Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>359.65</td> <td>3.00</td> <td>119.88</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>205.00</td> <td>1.00</td> <td>205.00</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2.00</td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>920.70</td> <td>2.37</td> <td>388.48</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>697.36</td> <td>2.45</td> <td>284.64</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1000</b></td> </tr> </tbody> </table> <p>Tabla C-2 <i>Ajuste por humedad de agregados - M01</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%H</th> <th>%A</th> <th>W Aj. (kg/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>0.30</td> <td>0.69</td> <td>923.46</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>0.54</td> <td>0.71</td> <td>701.12</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td></td> <td></td> <td>209.79</td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Absoluto (l/m <sup>3</sup> )	Cemento	359.65	3.00	119.88	Agua	205.00	1.00	205.00	Aire	0.00	0.00	2.00	Grava	920.70	2.37	388.48	Arena	697.36	2.45	284.64	FR	0.00	0.00	0.00	<b>Total</b>			<b>1000</b>		%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	Grava	0.30	0.69	923.46	Arena	0.54	0.71	701.12	Agua			209.79	<p><b>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Abr.</th> <th>Unidad</th> <th>Grueso</th> <th>Fino</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ms</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1288.99</td> <td>1281.22</td> </tr> <tr> <td>Mc</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1394.93</td> <td>1533.13</td> </tr> <tr> <td>D apa</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.32</td> <td>2.45</td> </tr> <tr> <td>D sss</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.37</td> <td>2.50</td> </tr> <tr> <td>%A</td> <td>%</td> <td>4.62</td> <td>2.09</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b></p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Asentamiento estimado</td> <td>mm</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>Tamaño máximo nominal del agregado</td> <td>mm</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>Cantidad de agua y contenido de aire</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Estimación contenido de agua de Mezclado</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>Cantidad aproximada de aire en concreto</td> <td>%</td> <td>2.00</td> </tr> <tr> <td>Selección relación agua/cemento</td> <td></td> <td>0.57</td> </tr> <tr> <td>Contenido de cemento</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>360</td> </tr> <tr> <td>Estimación contenido de grava</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Módulo de finura de arena</td> <td></td> <td>2.38</td> </tr> <tr> <td>Vol. de agregado grueso por vol. unitario</td> <td>m<sup>3</sup></td> <td>0.66</td> </tr> <tr> <td>Masa unitaria compacta</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1395</td> </tr> <tr> <td>Contenido total de grava</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>921</td> </tr> </tbody> </table>	Abr.	Unidad	Grueso	Fino	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1288.99	1281.22	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1394.93	1533.13	D apa	g/cm <sup>3</sup>	2.32	2.45	D sss	g/cm <sup>3</sup>	2.37	2.50	%A	%	4.62	2.09	Asentamiento estimado	mm	80	Tamaño máximo nominal del agregado	mm	19	Cantidad de agua y contenido de aire			Estimación contenido de agua de Mezclado	kg/m <sup>3</sup>	205	Cantidad aproximada de aire en concreto	%	2.00	Selección relación agua/cemento		0.57	Contenido de cemento	kg/m <sup>3</sup>	360	Estimación contenido de grava			Módulo de finura de arena		2.38	Vol. de agregado grueso por vol. unitario	m <sup>3</sup>	0.66	Masa unitaria compacta	kg/m <sup>3</sup>	1395	Contenido total de grava	kg/m <sup>3</sup>	921
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Absoluto (l/m <sup>3</sup> )																																																																																																											
Cemento	359.65	3.00	119.88																																																																																																											
Agua	205.00	1.00	205.00																																																																																																											
Aire	0.00	0.00	2.00																																																																																																											
Grava	920.70	2.37	388.48																																																																																																											
Arena	697.36	2.45	284.64																																																																																																											
FR	0.00	0.00	0.00																																																																																																											
<b>Total</b>			<b>1000</b>																																																																																																											
	%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )																																																																																																											
Grava	0.30	0.69	923.46																																																																																																											
Arena	0.54	0.71	701.12																																																																																																											
Agua			209.79																																																																																																											
Abr.	Unidad	Grueso	Fino																																																																																																											
Ms	kg/m <sup>3</sup>	1288.99	1281.22																																																																																																											
Mc	kg/m <sup>3</sup>	1394.93	1533.13																																																																																																											
D apa	g/cm <sup>3</sup>	2.32	2.45																																																																																																											
D sss	g/cm <sup>3</sup>	2.37	2.50																																																																																																											
%A	%	4.62	2.09																																																																																																											
Asentamiento estimado	mm	80																																																																																																												
Tamaño máximo nominal del agregado	mm	19																																																																																																												
Cantidad de agua y contenido de aire																																																																																																														
Estimación contenido de agua de Mezclado	kg/m <sup>3</sup>	205																																																																																																												
Cantidad aproximada de aire en concreto	%	2.00																																																																																																												
Selección relación agua/cemento		0.57																																																																																																												
Contenido de cemento	kg/m <sup>3</sup>	360																																																																																																												
Estimación contenido de grava																																																																																																														
Módulo de finura de arena		2.38																																																																																																												
Vol. de agregado grueso por vol. unitario	m <sup>3</sup>	0.66																																																																																																												
Masa unitaria compacta	kg/m <sup>3</sup>	1395																																																																																																												
Contenido total de grava	kg/m <sup>3</sup>	921																																																																																																												
		<p><b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b></p> <p>Tabla C-3 <i>Peso requerido - M01</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso humedo (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso requerido por ensayo (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>920.70</td> <td>923.46</td> <td>124.13</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>697.36</td> <td>701.12</td> <td>94.24</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>205.00</td> <td>209.79</td> <td>28.20</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>359.65</td> <td>359.65</td> <td>48.34</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b></p> 		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo (kg/m <sup>3</sup> )	Peso requerido por ensayo (kg)	Grava	920.70	923.46	124.13	Arena	697.36	701.12	94.24	Agua	205.00	209.79	28.20	FR	0.00	0.00	0.00	Cemento	359.65	359.65	48.34																																																																																				
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo (kg/m <sup>3</sup> )	Peso requerido por ensayo (kg)																																																																																																											
Grava	920.70	923.46	124.13																																																																																																											
Arena	697.36	701.12	94.24																																																																																																											
Agua	205.00	209.79	28.20																																																																																																											
FR	0.00	0.00	0.00																																																																																																											
Cemento	359.65	359.65	48.34																																																																																																											

## C.2 Diseño de Mezcla M02

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas		Diseño de Mezcla M02 Cantidad de fibra 1.8 kg/m <sup>3</sup> Fecha 14 de diciembre 2021	
CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS					
Masa unitaria suelta	Ms	kg/m <sup>3</sup>	Grueso	Fino	
Masa unitaria compacta	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1288.99	1281.22	
Densidad aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1394.93	1533.13	
Densidad saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.32	2.45	
Absorción	%A	%	2.37	2.50	
			4.62	2.09	
<b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b>					
Asentamiento estimado		mm	80		
Tamaño máximo nominal del agregado	TMN	mm	19		
Cantidad de agua y contenido de aire	W	kg/m <sup>3</sup>	205	Tabla 5.3.3	
Estimación contenida de agua de Mezclado	W/C	%	2.00		
Cantidad aproximada de aire en concreto	C	kg/m <sup>3</sup>	0.57	Tabla 5.3.4	
Selección relación agua/cemento			360		
Contenido de cemento					
Estimación contenido de grava	MF		2.38		
Módulo de finura de arena			0.66	Tabla 5.3.6	
Vol. de agregado grueso por vol. unitario	Mc	m <sup>3</sup>	1395		
Masa unitaria compacta			921		
Contenido total de grava	Grava	kg/m <sup>3</sup>			
<b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b>					
					
DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO					
Tabla C-4 Dosificación por volumen absoluto - M02					
		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Especifico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Absoluto (l/m <sup>3</sup> )	Volumen
Cemento		359.65	3.00	119.88	
Agua		205.00	1.00	205.00	
Aire		0.00	0.00	2.00	
Grava		920.70	2.37	388.48	
Arena		692.56	2.45	282.68	
FR		1.80	0.92	1.96	
			<b>Total</b>	<b>1000</b>	
Tabla C-5 Ajuste por humedad de agregados - M02					
		%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	
Grava		0.30	0.69	923.46	
Arena		0.54	0.71	696.30	
Agua				209.79	
<b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b>					
Tabla C-6 Peso requerido - M02					
		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)		
Grava		920.70	923.46	124.13	
Arena		692.56	696.30	93.59	
Agua		205.00	209.79	28.20	
FR		1.80	1.80	0.24	
Cemento		359.65	359.65	48.34	

### C.3 Diseño de Mezcla M03

<p style="text-align: center;"><b>Diseño de Mezcla</b> M03 <b>Cantidad de fibra</b> 6.0 kg/m<sup>3</sup> <b>Fecha</b> 15 de diciembre 2021</p>	<p style="text-align: center;"><b>Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas</b></p> <p style="text-align: center;"> <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</b></p>																																																																																												
<p style="text-align: center;"><b>DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO</b></p> <p>Tabla C-7 <i>Dosificación por volumen absoluto - M03</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Específico (g/cm<sup>3</sup>)</th> <th>Peso Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>359.65</td> <td>3.00</td> <td>119.88</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>205.00</td> <td>1.00</td> <td>205.00</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2.00</td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>920.70</td> <td>2.37</td> <td>388.48</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>681.38</td> <td>2.45</td> <td>278.11</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>6.00</td> <td>0.92</td> <td>6.52</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1000</b></td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> )	Cemento	359.65	3.00	119.88	Agua	205.00	1.00	205.00	Aire	0.00	0.00	2.00	Grava	920.70	2.37	388.48	Arena	681.38	2.45	278.11	FR	6.00	0.92	6.52	<b>Total</b>			<b>1000</b>	<p style="text-align: center;"><b>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Abbr.</th> <th>Unidad</th> <th>Grueso</th> <th>Fino</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ms</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1288.99</td> <td>1281.22</td> </tr> <tr> <td>Mc</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1394.93</td> <td>1533.13</td> </tr> <tr> <td>D apa</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.32</td> <td>2.45</td> </tr> <tr> <td>D sss</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.37</td> <td>2.50</td> </tr> <tr> <td>%A</td> <td>%</td> <td>4.62</td> <td>2.09</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b></p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Asentamiento estimado</td> <td>mm</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>Tamaño máximo nominal del agregado</td> <td>mm</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>Cantidad de agua y contenido de aire</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Estimación contenido de agua de Mezclado</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>Cantidad aproximada de aire en concreto</td> <td>%</td> <td>2.00</td> </tr> <tr> <td>Selección relación agua/cemento</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Contenido de cemento</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>0.57</td> </tr> <tr> <td>Estimación contenido de grava</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Módulo de finura de arena</td> <td></td> <td>2.38</td> </tr> <tr> <td>Vol. de agregado grueso por vol. unitario</td> <td>m<sup>3</sup></td> <td>0.66</td> </tr> <tr> <td>Masa unitaria compacta</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1395</td> </tr> <tr> <td>Contenido total de grava</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>921</td> </tr> </tbody> </table>	Abbr.	Unidad	Grueso	Fino	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1288.99	1281.22	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1394.93	1533.13	D apa	g/cm <sup>3</sup>	2.32	2.45	D sss	g/cm <sup>3</sup>	2.37	2.50	%A	%	4.62	2.09	Asentamiento estimado	mm	80	Tamaño máximo nominal del agregado	mm	19	Cantidad de agua y contenido de aire			Estimación contenido de agua de Mezclado	kg/m <sup>3</sup>	205	Cantidad aproximada de aire en concreto	%	2.00	Selección relación agua/cemento			Contenido de cemento	kg/m <sup>3</sup>	0.57	Estimación contenido de grava			Módulo de finura de arena		2.38	Vol. de agregado grueso por vol. unitario	m <sup>3</sup>	0.66	Masa unitaria compacta	kg/m <sup>3</sup>	1395	Contenido total de grava	kg/m <sup>3</sup>	921
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> )																																																																																										
Cemento	359.65	3.00	119.88																																																																																										
Agua	205.00	1.00	205.00																																																																																										
Aire	0.00	0.00	2.00																																																																																										
Grava	920.70	2.37	388.48																																																																																										
Arena	681.38	2.45	278.11																																																																																										
FR	6.00	0.92	6.52																																																																																										
<b>Total</b>			<b>1000</b>																																																																																										
Abbr.	Unidad	Grueso	Fino																																																																																										
Ms	kg/m <sup>3</sup>	1288.99	1281.22																																																																																										
Mc	kg/m <sup>3</sup>	1394.93	1533.13																																																																																										
D apa	g/cm <sup>3</sup>	2.32	2.45																																																																																										
D sss	g/cm <sup>3</sup>	2.37	2.50																																																																																										
%A	%	4.62	2.09																																																																																										
Asentamiento estimado	mm	80																																																																																											
Tamaño máximo nominal del agregado	mm	19																																																																																											
Cantidad de agua y contenido de aire																																																																																													
Estimación contenido de agua de Mezclado	kg/m <sup>3</sup>	205																																																																																											
Cantidad aproximada de aire en concreto	%	2.00																																																																																											
Selección relación agua/cemento																																																																																													
Contenido de cemento	kg/m <sup>3</sup>	0.57																																																																																											
Estimación contenido de grava																																																																																													
Módulo de finura de arena		2.38																																																																																											
Vol. de agregado grueso por vol. unitario	m <sup>3</sup>	0.66																																																																																											
Masa unitaria compacta	kg/m <sup>3</sup>	1395																																																																																											
Contenido total de grava	kg/m <sup>3</sup>	921																																																																																											
<p>Tabla C-8 <i>Ajuste por humedad de agregados - M03</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%H</th> <th>%A</th> <th>W Aj. (kg/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>0.30</td> <td>0.69</td> <td>923.46</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>0.54</td> <td>0.71</td> <td>685.06</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td></td> <td></td> <td>209.77</td> </tr> </tbody> </table>		%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	Grava	0.30	0.69	923.46	Arena	0.54	0.71	685.06	Agua			209.77	<p style="text-align: center;"><b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>																																																																												
	%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )																																																																																										
Grava	0.30	0.69	923.46																																																																																										
Arena	0.54	0.71	685.06																																																																																										
Agua			209.77																																																																																										
<p style="text-align: center;"><b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b></p> <p>Tabla C-9 <i>Peso requerido - M03</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso humedo requerido por ensayo (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>920.70</td> <td>923.46</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>681.38</td> <td>685.06</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>205.00</td> <td>209.77</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>6.00</td> <td>6.00</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>359.65</td> <td>359.65</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>48.34</td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)	Grava	920.70	923.46	Arena	681.38	685.06	Agua	205.00	209.77	FR	6.00	6.00	Cemento	359.65	359.65			48.34																																																																								
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)																																																																																											
Grava	920.70	923.46																																																																																											
Arena	681.38	685.06																																																																																											
Agua	205.00	209.77																																																																																											
FR	6.00	6.00																																																																																											
Cemento	359.65	359.65																																																																																											
		48.34																																																																																											

## C.4 Diseño de Mezcla M04

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas		M04 0 kg/m <sup>3</sup> 27 de septiembre 2022
Diseño de Mezcla Cantidad de fibra Fecha				
<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS</b>				
	Abr.	Unidad	Grueso	Fino
Masa unitaria suelta	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1293.68	1570.77
Masa unitaria compacta	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1355.52	1610.50
Densidad aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31	2.48
Densidad saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42	2.47
Absorción	%A	%	4.58	0.38
<b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b>				
Asentamiento estimado		mm	120	
Tamaño máximo nominal del agregado	TMN	mm	12.7	
Cantidad de agua y contenido de aire	W	kg/m <sup>3</sup>	228	Tabla 5.3.3
Estimación contenida de agua de Mezclado	W/C	%	2.50	Tabla 5.3.4
Cantidad aproximada de aire en concreto	C	%	0.62	Tabla 5.3.4
Selección relación agua/cemento		kg/m <sup>3</sup>	400	
Contenido de cemento				
Estimación contenida de grava	MF		2.81	
Módulo de finura de arena			0.55	Tabla 5.3.6
Vol. de agregado grueso por vol. unitario	Mc	m <sup>3</sup>	1356	
Masa unitaria compacta		kg/m <sup>3</sup>	746	
Contenido total de grava	Grava	kg/m <sup>3</sup>		
<b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b>				
				
<b>DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO</b>				
Tabla C-10 Dosificación por volumen absoluto - M04				
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Especifico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> )	
Cemento	400.00	3.00	133.33	
Agua	228.00	1.00	228.00	
Aire	0.00	0.00	2.50	
Grava	745.53	2.42	308.07	
Arena	813.68	2.48	328.10	
FR	0.00	0.92	0.00	
	Total		1000	
Tabla C-11 Ajuste por humedad de agregados - M04				
	%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	
Grava	0.41	4.58	748.59	
Arena	1.75	0.38	827.92	
Agua			247.87	
<b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b>				
Tabla C-12 Peso requerido - M04				
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)		
Grava	745.53	748.59	100.62	
Arena	813.68	827.92	111.29	
Agua	228.00	247.87	33.32	
FR	0.00	0.00	0.00	
Cemento	400.00	400.00	53.77	

## C.5 Diseño de Mezcla M05

<p style="text-align: center;"><b>Diseño de Mezcla</b> M05 <b>Cantidad de fibra</b> 4.5 kg/m<sup>3</sup> <b>Fecha</b> 28 de septiembre 2022</p>	<p style="text-align: center;"><b>Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas</b></p> <p style="text-align: center;"> <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</b></p>																																																																																																																										
<p style="text-align: center;"><b>DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO</b></p> <p>Tabla C-13 <i>Dosificación por volumen absoluto - M05</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">Peso</th> <th colspan="2">Volumen</th> </tr> <tr> <th>seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Específico (g/cm<sup>3</sup>)</th> <th>Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>400.00</td> <td>3.00</td> <td>133.33</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>228.00</td> <td>1.00</td> <td>228.00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2.50</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>745.53</td> <td>2.42</td> <td>308.07</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>801.55</td> <td>2.48</td> <td>323.20</td> <td></td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>4.50</td> <td>0.92</td> <td>4.89</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1000</b></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Peso		Volumen		seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Absoluto (l/m <sup>3</sup> )		Cemento	400.00	3.00	133.33		Agua	228.00	1.00	228.00		Aire	0.00	0.00	2.50		Grava	745.53	2.42	308.07		Arena	801.55	2.48	323.20		FR	4.50	0.92	4.89		<b>Total</b>			<b>1000</b>		<p style="text-align: center;"><b>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Abstr.</th> <th>Unidad</th> <th>Grueso</th> <th>Fino</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Masa unitaria suelta</td> <td>Ms</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1293.68</td> <td>1570.77</td> </tr> <tr> <td>Masa unitaria compacta</td> <td>Mc</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1355.52</td> <td>1610.50</td> </tr> <tr> <td>Densidad aparente</td> <td>D<sub>apa</sub></td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.31</td> <td>2.48</td> </tr> <tr> <td>Densidad saturada y seca</td> <td>D<sub>sss</sub></td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.42</td> <td>2.47</td> </tr> <tr> <td>Absorción</td> <td>%A</td> <td>%</td> <td>4.58</td> <td>0.38</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"><b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b></p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Asentamiento estimado</td> <td></td> <td>mm</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Tamaño máximo nominal del agregado</td> <td>TMN</td> <td>mm</td> <td>12.7</td> </tr> <tr> <td>Cantidad de agua y contenido de aire</td> <td>W</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>228</td> </tr> <tr> <td>Estimación contenida de agua de Mezclado</td> <td></td> <td>%</td> <td>Tabla 5.3.3</td> </tr> <tr> <td>Cantidad aproximada de aire en concreto</td> <td>W/C</td> <td>%</td> <td>2.50</td> </tr> <tr> <td>Selección relación agua/cemento</td> <td>C</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>0.62</td> </tr> <tr> <td>Contenido de cemento</td> <td></td> <td>%</td> <td>Tabla 5.3.4</td> </tr> <tr> <td>Estimación contenida de grava</td> <td>MF</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>2.81</td> </tr> <tr> <td>Módulo de finura de arena</td> <td></td> <td>m<sup>3</sup></td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>Vol. de agregado grueso por vol. unitario</td> <td>Mc</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1356</td> </tr> <tr> <td>Masa unitaria compacta</td> <td></td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>746</td> </tr> <tr> <td>Contenido total de grava</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Abstr.	Unidad	Grueso	Fino	Masa unitaria suelta	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1293.68	1570.77	Masa unitaria compacta	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1355.52	1610.50	Densidad aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31	2.48	Densidad saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42	2.47	Absorción	%A	%	4.58	0.38	Asentamiento estimado		mm	120	Tamaño máximo nominal del agregado	TMN	mm	12.7	Cantidad de agua y contenido de aire	W	kg/m <sup>3</sup>	228	Estimación contenida de agua de Mezclado		%	Tabla 5.3.3	Cantidad aproximada de aire en concreto	W/C	%	2.50	Selección relación agua/cemento	C	kg/m <sup>3</sup>	0.62	Contenido de cemento		%	Tabla 5.3.4	Estimación contenida de grava	MF	kg/m <sup>3</sup>	2.81	Módulo de finura de arena		m <sup>3</sup>	0.55	Vol. de agregado grueso por vol. unitario	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1356	Masa unitaria compacta		kg/m <sup>3</sup>	746	Contenido total de grava			
		Peso		Volumen																																																																																																																							
	seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Absoluto (l/m <sup>3</sup> )																																																																																																																								
Cemento	400.00	3.00	133.33																																																																																																																								
Agua	228.00	1.00	228.00																																																																																																																								
Aire	0.00	0.00	2.50																																																																																																																								
Grava	745.53	2.42	308.07																																																																																																																								
Arena	801.55	2.48	323.20																																																																																																																								
FR	4.50	0.92	4.89																																																																																																																								
<b>Total</b>			<b>1000</b>																																																																																																																								
	Abstr.	Unidad	Grueso	Fino																																																																																																																							
Masa unitaria suelta	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1293.68	1570.77																																																																																																																							
Masa unitaria compacta	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1355.52	1610.50																																																																																																																							
Densidad aparente	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31	2.48																																																																																																																							
Densidad saturada y seca	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42	2.47																																																																																																																							
Absorción	%A	%	4.58	0.38																																																																																																																							
Asentamiento estimado		mm	120																																																																																																																								
Tamaño máximo nominal del agregado	TMN	mm	12.7																																																																																																																								
Cantidad de agua y contenido de aire	W	kg/m <sup>3</sup>	228																																																																																																																								
Estimación contenida de agua de Mezclado		%	Tabla 5.3.3																																																																																																																								
Cantidad aproximada de aire en concreto	W/C	%	2.50																																																																																																																								
Selección relación agua/cemento	C	kg/m <sup>3</sup>	0.62																																																																																																																								
Contenido de cemento		%	Tabla 5.3.4																																																																																																																								
Estimación contenida de grava	MF	kg/m <sup>3</sup>	2.81																																																																																																																								
Módulo de finura de arena		m <sup>3</sup>	0.55																																																																																																																								
Vol. de agregado grueso por vol. unitario	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1356																																																																																																																								
Masa unitaria compacta		kg/m <sup>3</sup>	746																																																																																																																								
Contenido total de grava																																																																																																																											
<p>Tabla C-14 <i>Ajuste por humedad de agregados - M05</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%H</th> <th>%A</th> <th>W Aj. (kg/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>0.41</td> <td>4.58</td> <td>748.59</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>1.75</td> <td>0.38</td> <td>815.57</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td></td> <td></td> <td>247.87</td> </tr> </tbody> </table>		%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	Grava	0.41	4.58	748.59	Arena	1.75	0.38	815.57	Agua			247.87	<p style="text-align: center;"><b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b></p> <p>Tabla C-15 <i>Peso requerido - M05</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso humedo requerido por ensayo (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>745.53</td> <td>748.59</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>801.55</td> <td>815.57</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>228.00</td> <td>247.87</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>4.50</td> <td>4.50</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>400.00</td> <td>400.00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>53.77</td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)	Grava	745.53	748.59	Arena	801.55	815.57	Agua	228.00	247.87	FR	4.50	4.50	Cemento	400.00	400.00			53.77																																																																																					
	%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )																																																																																																																								
Grava	0.41	4.58	748.59																																																																																																																								
Arena	1.75	0.38	815.57																																																																																																																								
Agua			247.87																																																																																																																								
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)																																																																																																																									
Grava	745.53	748.59																																																																																																																									
Arena	801.55	815.57																																																																																																																									
Agua	228.00	247.87																																																																																																																									
FR	4.50	4.50																																																																																																																									
Cemento	400.00	400.00																																																																																																																									
		53.77																																																																																																																									
<p style="text-align: center;"><b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b></p> <p>Tabla C-15 <i>Peso requerido - M05</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso humedo requerido por ensayo (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>745.53</td> <td>748.59</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>801.55</td> <td>815.57</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>228.00</td> <td>247.87</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>4.50</td> <td>4.50</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>400.00</td> <td>400.00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>53.77</td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)	Grava	745.53	748.59	Arena	801.55	815.57	Agua	228.00	247.87	FR	4.50	4.50	Cemento	400.00	400.00			53.77	<p style="text-align: center;"><b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>																																																																																																					
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo requerido por ensayo (kg)																																																																																																																									
Grava	745.53	748.59																																																																																																																									
Arena	801.55	815.57																																																																																																																									
Agua	228.00	247.87																																																																																																																									
FR	4.50	4.50																																																																																																																									
Cemento	400.00	400.00																																																																																																																									
		53.77																																																																																																																									

## C.6 Diseño de Mezcla M06

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</p> <p>Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas</p> <p><b>Diseño de Mezcla</b> M06  <b>Cantidad de fibra</b> 7.5 kg/m<sup>3</sup>  <b>Fecha</b> 29 de septiembre 2022</p>	<p><b>DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN ABSOLUTO</b></p> <p>Tabla C-16 <i>Dosificación por volumen absoluto - M06</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Específico (g/cm<sup>3</sup>)</th> <th>Peso Volumen Absoluto (l/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>400.00</td> <td>3.00</td> <td>133.33</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>228.00</td> <td>1.00</td> <td>228.00</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>2.50</td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>745.53</td> <td>2.42</td> <td>308.07</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>793.46</td> <td>2.48</td> <td>319.94</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>7.50</td> <td>0.92</td> <td>8.15</td> </tr> <tr> <td><b>Total</b></td> <td></td> <td></td> <td><b>1000</b></td> </tr> </tbody> </table> <p>Tabla C-17 <i>Ajuste por humedad de agregados - M06</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>%H</th> <th>%A</th> <th>W Aj. (kg/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>0.41</td> <td>4.58</td> <td>748.59</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>1.75</td> <td>0.38</td> <td>807.34</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td></td> <td></td> <td>247.87</td> </tr> </tbody> </table>		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> )	Cemento	400.00	3.00	133.33	Agua	228.00	1.00	228.00	Aire	0.00	0.00	2.50	Grava	745.53	2.42	308.07	Arena	793.46	2.48	319.94	FR	7.50	0.92	8.15	<b>Total</b>			<b>1000</b>		%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )	Grava	0.41	4.58	748.59	Arena	1.75	0.38	807.34	Agua			247.87
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Volumen Absoluto (l/m <sup>3</sup> )																																														
Cemento	400.00	3.00	133.33																																														
Agua	228.00	1.00	228.00																																														
Aire	0.00	0.00	2.50																																														
Grava	745.53	2.42	308.07																																														
Arena	793.46	2.48	319.94																																														
FR	7.50	0.92	8.15																																														
<b>Total</b>			<b>1000</b>																																														
	%H	%A	W Aj. (kg/m <sup>3</sup> )																																														
Grava	0.41	4.58	748.59																																														
Arena	1.75	0.38	807.34																																														
Agua			247.87																																														
<p><b>Características de los agregados</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Abr.</th> <th>Unidad</th> <th>Grueso</th> <th>Fino</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ms</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1293.68</td> <td>1570.77</td> </tr> <tr> <td>Mc</td> <td>kg/m<sup>3</sup></td> <td>1355.52</td> <td>1610.50</td> </tr> <tr> <td>D<sub>apa</sub></td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.31</td> <td>2.48</td> </tr> <tr> <td>D<sub>sss</sub></td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.42</td> <td>2.47</td> </tr> <tr> <td>%A</td> <td>%</td> <td>4.58</td> <td>0.38</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>DISEÑO DE MEZCLA ACI 211.1-22</b></p> <p>Asentamiento estimado: 120 mm</p> <p>Tamaño máximo nominal del agregado: 12.7 mm</p> <p>Cantidad de agua y contenido de aire: 228 kg/m<sup>3</sup> (Tabla 5.3.3)</p> <p>Estimación contenido de agua de Mezclado: 2.50 % (Tabla 5.3.4)</p> <p>Cantidad aproximada de aire en concreto: 0.62 % (Tabla 5.3.4)</p> <p>Selección relación agua/cemento: 400 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Contenido de cemento: 2.81 m<sup>3</sup></p> <p>Estimación contenido de grava: 0.55 m<sup>3</sup> (Tabla 5.3.6)</p> <p>Módulo de finura de arena: 1356 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Vol. de agregado grueso por vol. unitario: 746 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Masa unitaria compacta: 746 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Contenido total de grava: 746 kg/m<sup>3</sup></p>	Abr.	Unidad	Grueso	Fino	Ms	kg/m <sup>3</sup>	1293.68	1570.77	Mc	kg/m <sup>3</sup>	1355.52	1610.50	D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31	2.48	D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42	2.47	%A	%	4.58	0.38	<p><b>PESO POR CANTIDAD REQUERIDA</b></p> <p>Tabla C-18 <i>Peso requerido - M06</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso seco (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso humedo (kg/m<sup>3</sup>)</th> <th>Peso requerido por ensayo (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grava</td> <td>745.53</td> <td>748.59</td> <td>100.62</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>793.46</td> <td>807.34</td> <td>108.52</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>228.00</td> <td>247.87</td> <td>33.32</td> </tr> <tr> <td>FR</td> <td>7.50</td> <td>7.50</td> <td>1.01</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>400.00</td> <td>400.00</td> <td>53.77</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>FOTOGRAFÍAS DÍA DE MEZCLADO</b></p> 		Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo (kg/m <sup>3</sup> )	Peso requerido por ensayo (kg)	Grava	745.53	748.59	100.62	Arena	793.46	807.34	108.52	Agua	228.00	247.87	33.32	FR	7.50	7.50	1.01	Cemento	400.00	400.00	53.77
Abr.	Unidad	Grueso	Fino																																														
Ms	kg/m <sup>3</sup>	1293.68	1570.77																																														
Mc	kg/m <sup>3</sup>	1355.52	1610.50																																														
D <sub>apa</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.31	2.48																																														
D <sub>sss</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.42	2.47																																														
%A	%	4.58	0.38																																														
	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )	Peso humedo (kg/m <sup>3</sup> )	Peso requerido por ensayo (kg)																																														
Grava	745.53	748.59	100.62																																														
Arena	793.46	807.34	108.52																																														
Agua	228.00	247.87	33.32																																														
FR	7.50	7.50	1.01																																														
Cemento	400.00	400.00	53.77																																														

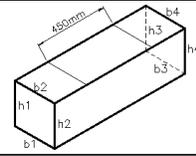
## **Anexo D: Dimensionamiento de Probetas**

ITEM		M01-01			M01-02			M01-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	156.34	157.58	1.17	157.18	158.08	1.17	155.79	157.13	2.15
	b2	157.00			158.80			158.12		
	b3	159.04			156.99			154.95		
	b4	157.92			159.34			159.64		
Altura h (mm)	h1	150.97	151.08	0.17	151.84	151.57	0.47	151.27	151.29	0.38
	h2	151.31			151.01			151.83		
	h3	150.95			152.06			151.07		
	h4	151.10			151.38			151.00		
ITEM		M01-04			M01-05			M01-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	159.81	160.26	2.17	156.62	156.41	0.41	155.37	156.73	1.16
	b2	158.62			156.31			156.45		
	b3	163.43			156.82			158.18		
	b4	159.16			155.87			156.92		
Altura h (mm)	h1	151.46	152.34	0.75	150.43	151.26	0.56	152.97	151.76	0.84
	h2	152.87			151.59			151.13		
	h3	151.98			151.46			151.69		
	h4	153.05			151.56			151.24		
ITEM		M01-07			M01-08			M01-09		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	152.06	156.16	3.75	160.48	158.51	2.35	154.27	154.65	0.85
	b2	153.92			159.75			154.56		
	b3	158.93			158.64			153.92		
	b4	159.72			155.18			155.86		
Altura h (mm)	h1	151.93	152.20	0.42	152.62	152.09	0.61	155.92	156.49	0.80
	h2	151.76			151.88			156.21		
	h3	152.66			152.55			157.67		
	h4	152.45			151.32			156.14		



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas

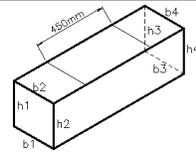


ITEM		M02-01			M02-02			M02-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	155.90	156.11	1.56	155.03	156.58	1.18	158.27	156.94	2.18
	b2	154.85			157.37			155.30		
	b3	158.36			156.30			159.29		
	b4	155.33			157.61			154.88		
Altura h (mm)	h1	152.55	151.65	0.87	151.53	151.83	0.75	151.79	152.03	1.04
	h2	151.96			151.68			153.53		
	h3	151.59			151.20			151.70		
	h4	150.49			152.92			151.11		
ITEM		M02-04			M02-05			M02-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	161.18	158.17	2.49	154.38	156.41	1.98	158.95	158.31	0.90
	b2	158.71			158.67			158.98		
	b3	157.60			155.18			157.05		
	b4	155.18			157.41			158.27		
Altura h (mm)	h1	152.62	152.08	0.54	151.06	152.20	1.62	152.31	153.54	3.02
	h2	151.73			154.60			152.31		
	h3	152.45			151.59			151.51		
	h4	151.52			151.56			158.04		
ITEM		M02-07			M02-08			M02-09		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	150.99	152.14	1.90	155.99	158.74	2.17	160.70	160.32	0.52
	b2	150.61			160.81			160.13		
	b3	152.13			158.05			159.67		
	b4	154.82			160.09			160.79		
Altura h (mm)	h1	154.45	156.02	1.22	152.79	151.98	1.55	151.82	153.18	1.35
	h2	157.36			150.33			155.02		
	h3	156.46			151.09			152.68		
	h4	155.82			153.71			153.19		

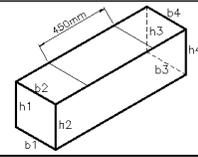


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

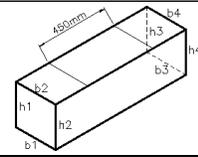
Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas



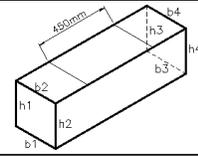
ITEM		M03-01			M03-02			M03-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	157.64	156.65	1.47	157.53	157.61	1.12	154.98	154.91	0.79
	b2	154.75			157.16			154.96		
	b3	156.23			159.17			153.88		
	b4	157.97			156.56			155.8		
Altura h (mm)	h1	153.59	152.49	0.98	153.31	152.00	1.22	157.91	154.90	2.57
	h2	151.81			152.67			152.71		
	h3	153.02			151.43			156.15		
	h4	151.52			150.59			152.82		
ITEM		M03-04			M03-05			M03-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	153.89	155.84	2.33	158.50	157.26	1.07	161.02	158.69	2.12
	b2	158.71			157.67			159.74		
	b3	153.99			156.87			157.77		
	b4	156.75			156.00			156.21		
Altura h (mm)	h1	151.54	151.70	0.77	151.99	152.19	0.31	152.69	152.18	0.57
	h2	151.11			152.65			151.53		
	h3	152.82			152.01			152.62		
	h4	151.31			152.12			151.86		
ITEM		M03-07			M03-08			M03-09		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	155.73	158.40	1.99	159.74	160.04	0.49	157.36	157.04	2.01
	b2	159.74			160.18			155.48		
	b3	158.05			159.57			159.76		
	b4	160.07			160.66			155.55		
Altura h (mm)	h1	152.99	152.35	1.22	151.93	153.01	1.59	151.19	151.77	0.84
	h2	151.38			155.15			152.98		
	h3	151.26			151.69			151.66		
	h4	153.75			153.25			151.23		



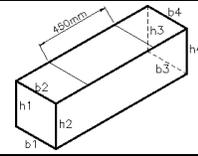
ITEM		M04-01			M04-02			M04-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	156.20	156.66	0.44	158.42	159.18	0.85	159.40	158.18	0.83
	b2	156.41			158.5			157.81		
	b3	157.19			160.11			157.53		
	b4	156.83			159.67			157.99		
Altura h (mm)	h1	151.21	151.14	0.58	151.46	152.08	0.61	151.18	151.76	0.80
	h2	151.10			152.91			151.15		
	h3	150.42			151.89			151.87		
	h4	151.84			152.06			152.85		
ITEM		M04-04			M04-05			M04-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	155.15	155.16	0.57	155.33	154.41	2.22	150.35	158.69	1.14
	b2	154.56			157.07			152.89		
	b3	155.93			153.02			152.53		
	b4	155.01			152.20			151.57		
Altura h (mm)	h1	151.59	151.27	0.57	151.22	151.44	0.25	158.69	154.46	2.95
	h2	151.83			151.40			153.25		
	h3	151.13			151.33			151.9		
	h4	150.54			151.80			153.99		
ITEM		M04-07			M04-08					
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación			
Base b (mm)	b1	153.84	155.93	1.81	158.11	156.29	1.40			
	b2	156.47			155.88					
	b3	155.30			154.76					
	b4	158.12			156.42					
Altura h (mm)	h1	151.13	151.06	0.08	158.32	154.39	3.35			
	h2	151.02			155.92					
	h3	150.96			150.97					
	h4	151.12			152.35					



ITEM		M05-01			M05-02			M05-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	157.89	157.91	0.72	149.07	149.00	2.03	149.11	150.37	2.32
	b2	156.93			146.55			152.27		
	b3	158.60			148.86			147.73		
	b4	158.23			151.52			152.37		
Altura h (mm)	h1	151.92	152.54	0.97	153.62	152.04	1.09	151.64	152.37	1.27
	h2	153.95			151.46			151.53		
	h3	152.41			151.20			154.25		
	h4	151.87			151.89			152.06		
ITEM		M05-04			M05-05			M05-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	156.84	158.30	3.18	150.29	153.29	2.43	153.47	162.84	12.23
	b2	154.61			152.40			152.19		
	b3	160.07			154.76			167.98		
	b4	161.69			155.69			177.70		
Altura h (mm)	h1	174.15	162.16	10.80	174.15	162.16	10.80	159.59	155.04	4.29
	h2	168.40			168.4			154.25		
	h3	153.56			153.56			149.49		
	h4	152.51			152.51			156.82		
ITEM		M05-07			M05-08			M05-09		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	155.72	158.00	1.92	153.4	154.72	1.27	158.09	157.71	2.18
	b2	157.70			154.49			160.11		
	b3	158.18			154.53			154.82		
	b4	160.40			156.46			157.83		
Altura h (mm)	h1	154.28	152.46	1.43	152.21	151.48	0.74	150.80	151.11	0.40
	h2	151.21			151.63			151.66		
	h3	151.43			150.45			150.84		
	h4	152.91			151.64			151.12		



ITEM		M06-01			M06-02			M06-03		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	155.45	153.96	2.09	155.88	155.08	1.48	150.34	152.87	1.85
	b2	155.91			155.13			153.99		
	b3	151.46			152.98			154.48		
	b4	153.02			156.31			152.68		
Altura h (mm)	h1	151.74	153.38	2.93	151.98	151.72	0.29	151.96	151.07	0.92
	h2	151.79			151.86			149.87		
	h3	152.22			151.32			150.89		
	h4	157.76			151.72			151.57		
ITEM		M06-04			M06-05			M06-06		
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación
Base b (mm)	b1	156.81	155.83	0.71	154.11	155.33	2.00	156.80	155.96	0.81
	b2	155.13			153.19			155.22		
	b3	155.67			157.37			155.32		
	b4	155.69			156.66			156.51		
Altura h (mm)	h1	152.2	151.62	0.44	150.76	152.15	1.14	150.68	151.07	0.39
	h2	151.56			152.64			151.37		
	h3	151.60			151.77			150.78		
	h4	151.13			153.42			151.44		
ITEM		M06-07			M06-08					
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación			
Base b (mm)	b1	154.05	155.37	2.05	153.46	154.63	1.85			
	b2	155.50			156.76					
	b3	153.72			152.75					
	b4	158.22			155.55					
Altura h (mm)	h1	151.02	150.83	0.32	151.39	151.83	0.56			
	h2	150.36			152.14					
	h3	151.05			152.46					
	h4	150.89			151.33					

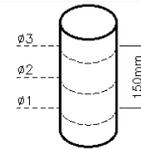


ITEM		M01-01			M01-02			M01-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-01	Diámetro (mm)	φ1	103.02	102.85	0.24	102.45	102.10	0.35	101.75	101.99	0.23
		φ2	102.96			102.11			102.01		
		φ3	102.58			101.75			102.21		
ITEM		M02-01			M02-02			M02-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-02	Diámetro (mm)	φ1	102.46	101.88	0.57	104.35	102.79	1.59	102.13	101.59	0.58
		φ2	101.85			102.86			101.65		
		φ3	101.32			101.17			100.98		
ITEM		M03-01			M03-02			M03-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-03	Diámetro (mm)	φ1	101.97	101.59	0.41	102.44	102.25	0.25	103.08	102.95	0.15
		φ2	101.66			102.33			102.98		
		φ3	101.15			101.97			102.79		
ITEM		M04-01			M04-02			M04-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-04	Diámetro (mm)	φ1	102.13	101.92	0.26	101.54	101.57	0.02	100.95	101.33	0.49
		φ2	102.01			101.59			101.88		
		φ3	101.63			101.58			101.15		
ITEM		M05-01			M05-02			M05-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-05	Diámetro (mm)	φ1	103.07	103.14	0.21	102.90	102.70	0.22	101.79	102.20	0.61
		φ2	103.37			102.75			101.92		
		φ3	102.97			102.46			102.90		
ITEM		M06-01			M06-02			M06-03			
		Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	Dato	Promedio	Desviación	
M-06	Diámetro (mm)	φ1	102.39	102.02	0.51	103.04	102.46	0.51	100.69	100.91	0.35
		φ2	102.23			102.28			101.32		
		φ3	101.44			102.06			100.72		



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

Comportamiento a Flexión de Vigas de Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno Sometidas a Cargas Cíclicas

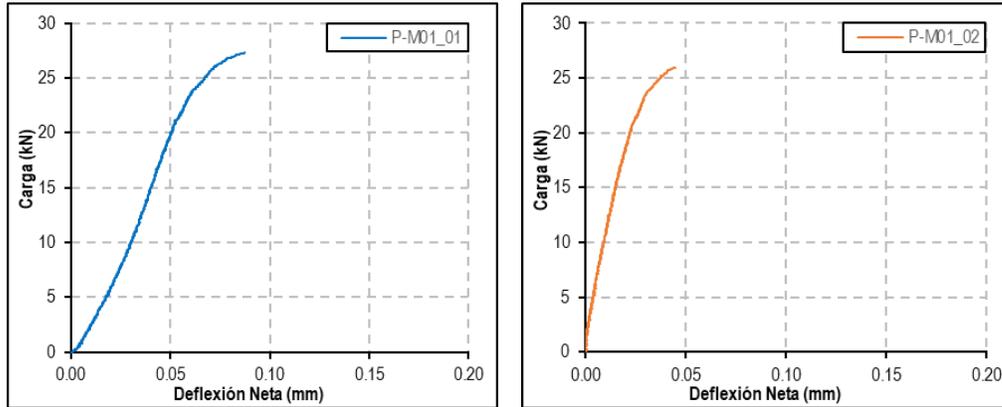




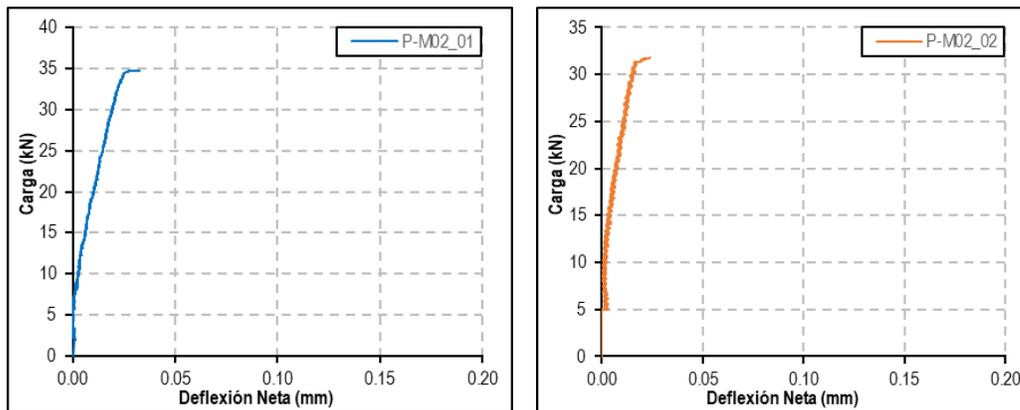
## Anexo E: Resultados Individuales Ensayo a Flexión ASTM C1609

**Nota:** La nomenclatura usada en las siguientes tablas para indicar los parámetros de flexión obtenidos a partir de las gráficas carga-deflexión son los siguientes:

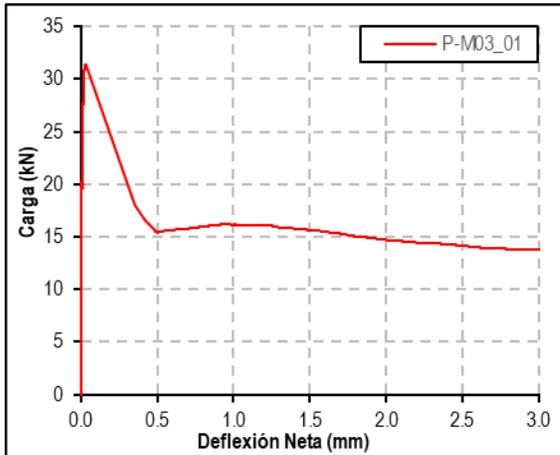
Primer pico de carga	$P_1$	(kN)
Deflexión neta al primer pico	$\delta_1$	(mm)
Esfuerzo en primer pico	$f_1$	(MPa)
Carga pico	$P_P$	(kN)
Deflexión neta pico	$\delta_P$	(mm)
Esfuerzo pico	$f_P$	(MPa)
Carga residual a deflexión neta L/600	$P_{600}^{150}$	(kN)
Esfuerzo residual a deflexión neta L/600	$f_{600}^{150}$	(MPa)
Carga residual a deflexión neta L/150	$P_{150}^{150}$	(kN)
Esfuerzo residual a deflexión neta L/150	$f_{150}^{150}$	(MPa)
Área bajo la curva a deflexión neta L/150	$T_{150}^{150}$	(J)
Relación esfuerzo a flexión equivalente	$R_{T,150}^{150}$	(%)

**Gráfica E-1:** Curva carga-deflexión Mezcla M01.**Tabla E-1:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M01.

Parámetros de flexión		Viga		X	S	CV (%)
		_01	_02			
$P_1$	(kN)	27.29	25.94	26.61	0.68	2.55
$\delta_1$	(mm)	0.0876	0.045	0.07	0.02	32.08
$f_1$	(MPa)	3.38	3.25	3.31	0.07	2.06
T	(J)	2.59	2.61	2.60	0.01	0.36
$R_{T,150}^{150}$	(%)	3.17	3.36	3.26	0.10	2.91

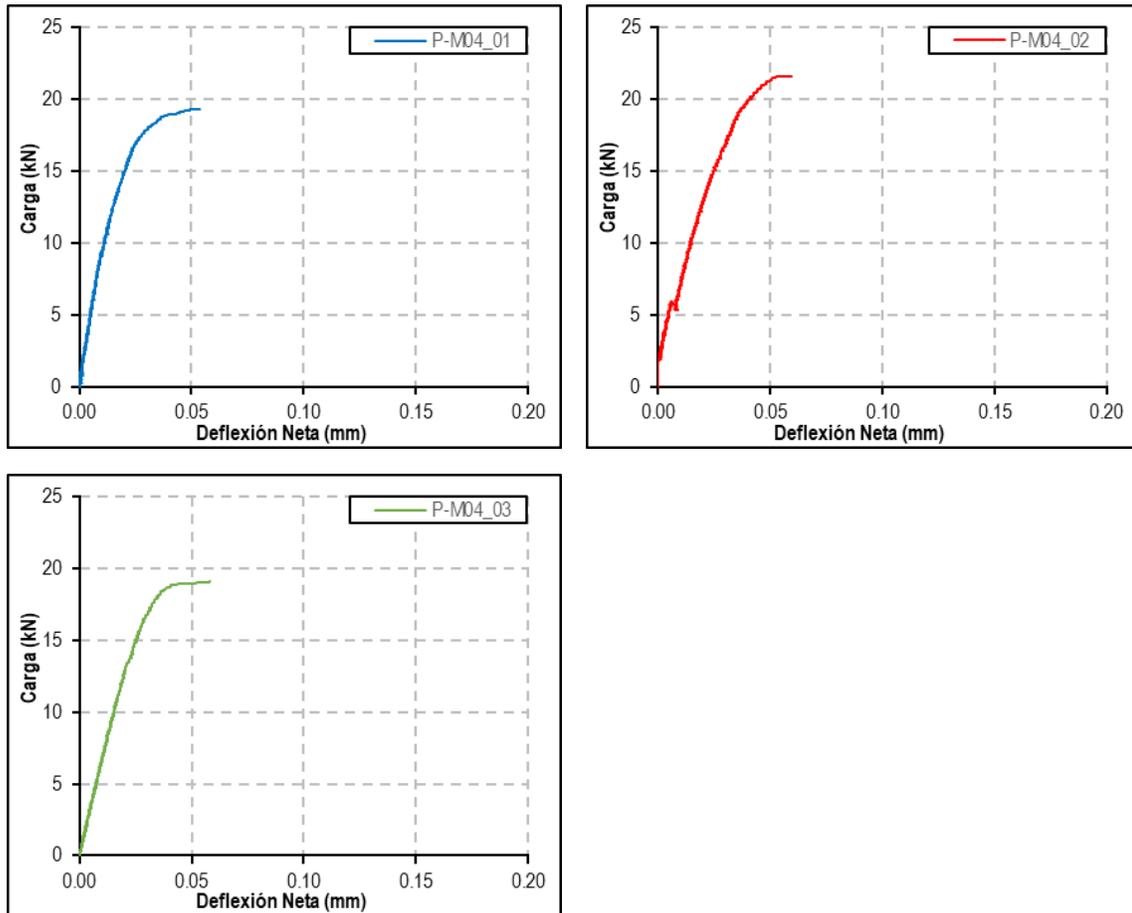
**Gráfica E-2:** Curva carga-deflexión Mezcla M02.**Tabla E-2:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M02.

Parámetros de flexión		Viga		X	S	CV (%)
		_01	_02			
$P_1$	(kN)	34.78	31.81	33.30	1.49	4.47
$\delta_1$	(mm)	0.0302	0.024	0.03	0.00	11.54
$f_1$	(MPa)	4.36	3.97	4.16	0.20	4.73
T	(J)	3.11	7.14	5.12	2.01	39.27
$R_{T,150}^{150}$	(%)	2.98	7.48	5.23	2.25	42.99

**Gráfica E-3:** Curva carga-deflexión Mezcla M03.**Tabla E-3:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M03.

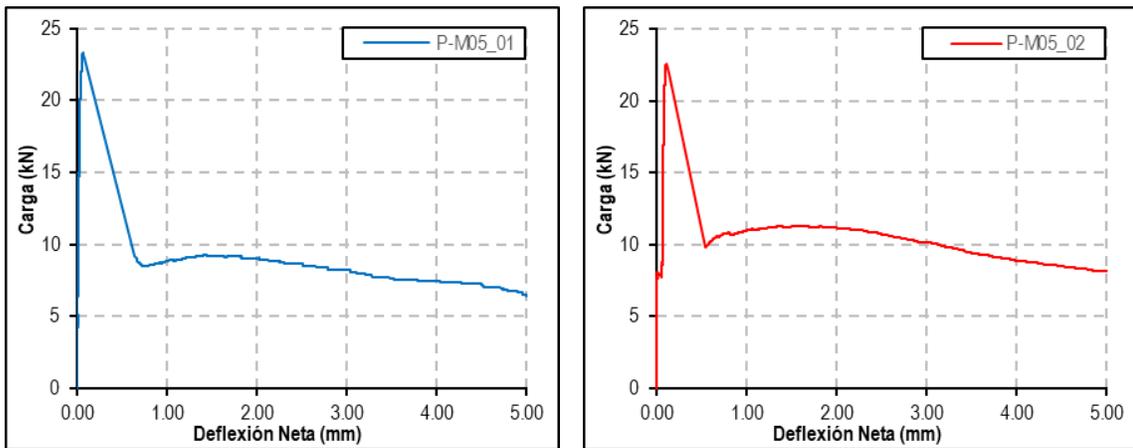
Parámetros de flexión	Viga		X	S	CV (%)
	_01	_02			
$P_1$ (kN)	31.40	-	-	-	-
$\delta_1$ (mm)	0.0314	-	-	-	-
$f_1$ (MPa)	3.88	-	-	-	-
$P_{600}^{150}$ (kN)	15.89	-	-	-	-
$f_{600}^{150}$ (MPa)	1.96	-	-	-	-
$P_{300}^{150}$ (kN)	16.18	-	-	-	-
$f_{300}^{150}$ (MPa)	2.00	-	-	-	-
$P_{150}^{150}$ (kN)	13.76	-	-	-	-
$f_{150}^{150}$ (MPa)	1.70	-	-	-	-
$T_{150}^{150}$ (J)	50.33	-	-	-	-
$R_{T,150}^{150}$ (%)	53.43	-	-	-	-

**Nota:** El resultado de la vigueta M\_03\_02 fue descartado de los siguientes análisis debido a que la probeta falló por fuera del tercio medio.

**Gráfica E-4:** Curva carga-deflexión Mezcla M04.**Tabla E-4:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M04.

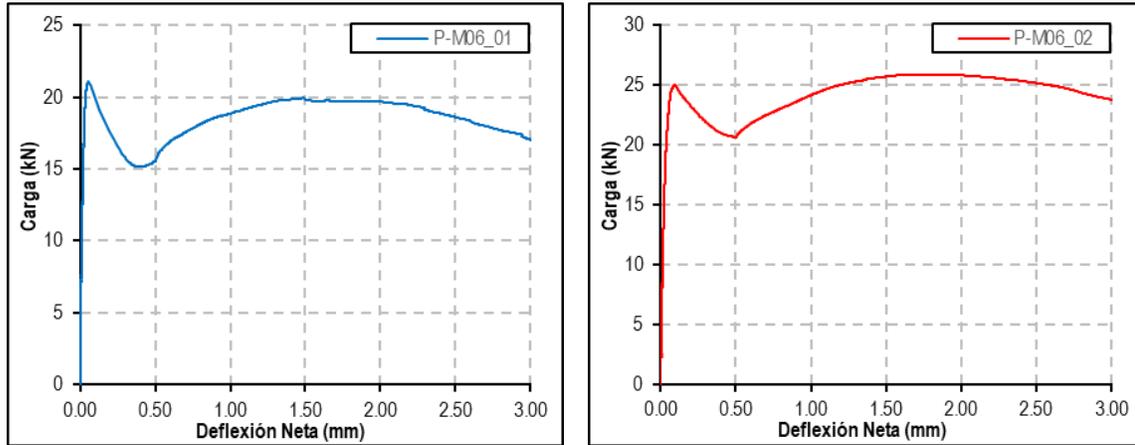
Parámetros de flexión	Viga			X	S	CV (%)
	_01	_02	_03			
$P_1$ (kN)	19.28	21.59	19.09	19.99	1.14	5.69
$\delta_1$ (mm)	0.0622	0.060	0.058	0.06	0.002	2.70
$f_1$ (MPa)	2.42	2.64	2.36	2.47	0.12	4.85
T (J)	1.45	1.80	1.25	1.50	0.23	15.16
$R_{7,150}^{150}$ (%)	2.50	2.79	2.19	2.49	0.24	9.78

**Gráfica E-5:** Curva carga-deflexión Mezcla M05.



**Tabla E-5:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M05.

Parámetros de flexión	Viga		X	S	CV (%)	
	_01	_02				
$P_1$	(kN)	23.30	21.85	22.58	0.73	3.21
$\delta_1$	(mm)	0.0610	0.142	0.10	0.04	39.83
$f_1$	(MPa)	2.85	2.86	2.85	0.001	0.02
$P_{600}^{150}$	(kN)	8.50	10.75	9.63	1.122	11.65
$f_{600}^{150}$	(MPa)	1.04	1.40	1.22	0.181	14.83
$P_{600}^{150}$	(kN)	9.26	11.31	10.29	1.024	9.96
$f_{600}^{150}$	(MPa)	1.13	1.48	1.31	0.172	13.15
$P_{150}^{150}$	(kN)	8.22	10.13	9.17	0.953	10.39
$f_{150}^{150}$	(MPa)	1.01	1.32	1.16	0.158	13.57
$T_{150}^{150}$	(J)	32.58	35.91	34.25	1.666	4.86
$R_{T,150}^{150}$	(%)	46.60	54.78	50.69	4.087	8.06

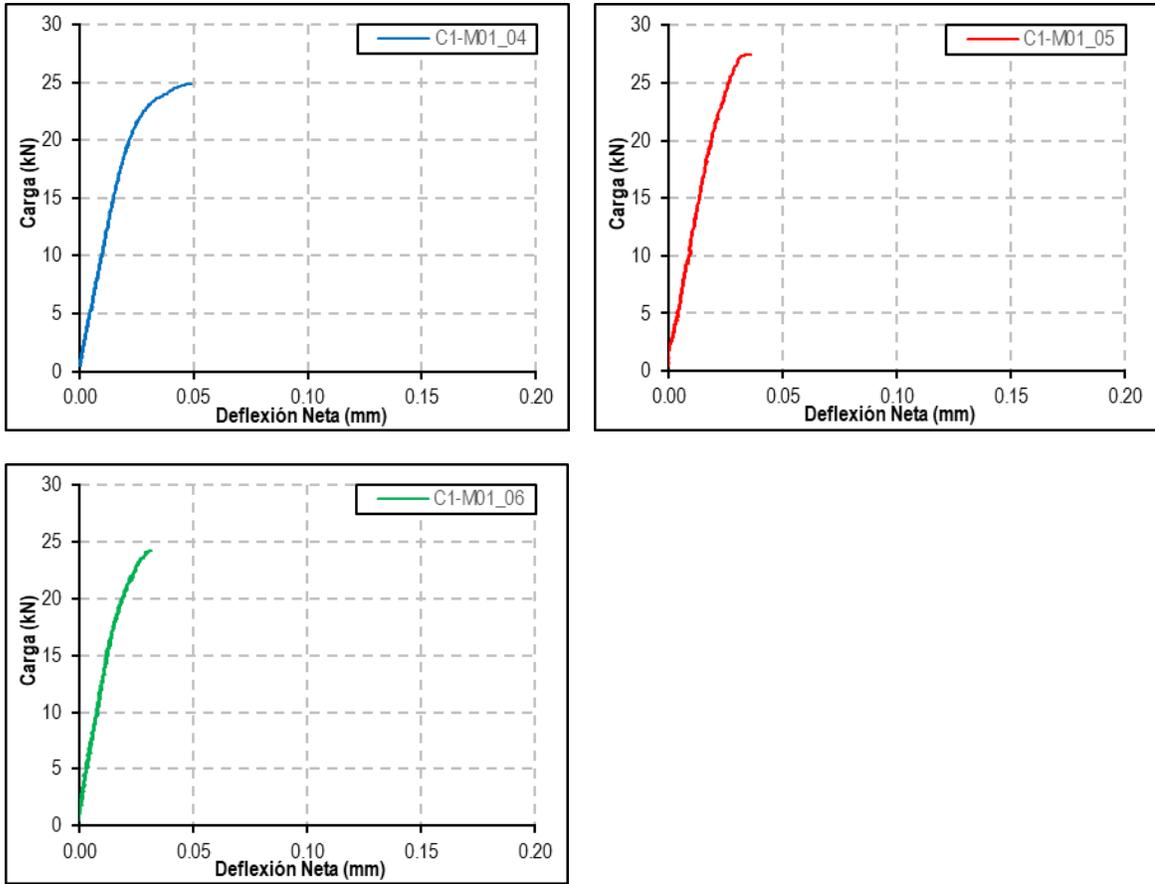
**Gráfica E-6:** Curva carga-deflexión Mezcla M06.**Tabla D-6-9:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M06.

Parámetros de flexión	Viga	X	S	CV (%)		
					_01	_02
$P_1$	(kN)	21.06	24.94	23.00	1.94	8.43
$\delta_1$	(mm)	0.0541	0.094	0.07	0.02	26.90
$f_1$	(MPa)	2.62	3.14	2.88	0.26	9.14
$P_P$	(kN)	-	25.85	-	-	-
$\delta_P$	(mm)	-	1.91	-	-	-
$f_P$	(MPa)	-	3.26	-	-	-
$P_{600}^{150}$	(kN)	17.81	22.75	20.28	2.47	12.16
$f_{600}^{150}$	(MPa)	2.21	2.87	2.54	0.33	12.86
$P_{300}^{150}$	(kN)	19.93	-	-	-	-
$f_{300}^{150}$	(MPa)	2.48	-	-	-	-
$P_{150}^{150}$	(kN)	17.03	23.74	20.39	3.36	16.47
$f_{150}^{150}$	(MPa)	2.12	2.99	2.55	0.44	17.16
$T_{150}^{150}$	(J)	56.26	74.42	65.34	9.08	13.90
$R_{T,150}^{150}$	(%)	89.03	99.46	94.24	5.21	5.53

**Nota:** La viga M06\_02 tuvo comportamiento de tipo endurecimiento, por lo tanto, el valor tomado para la deflexión aproximada a  $L/300$  coincide con el valor para su carga pico  $P_p$ .

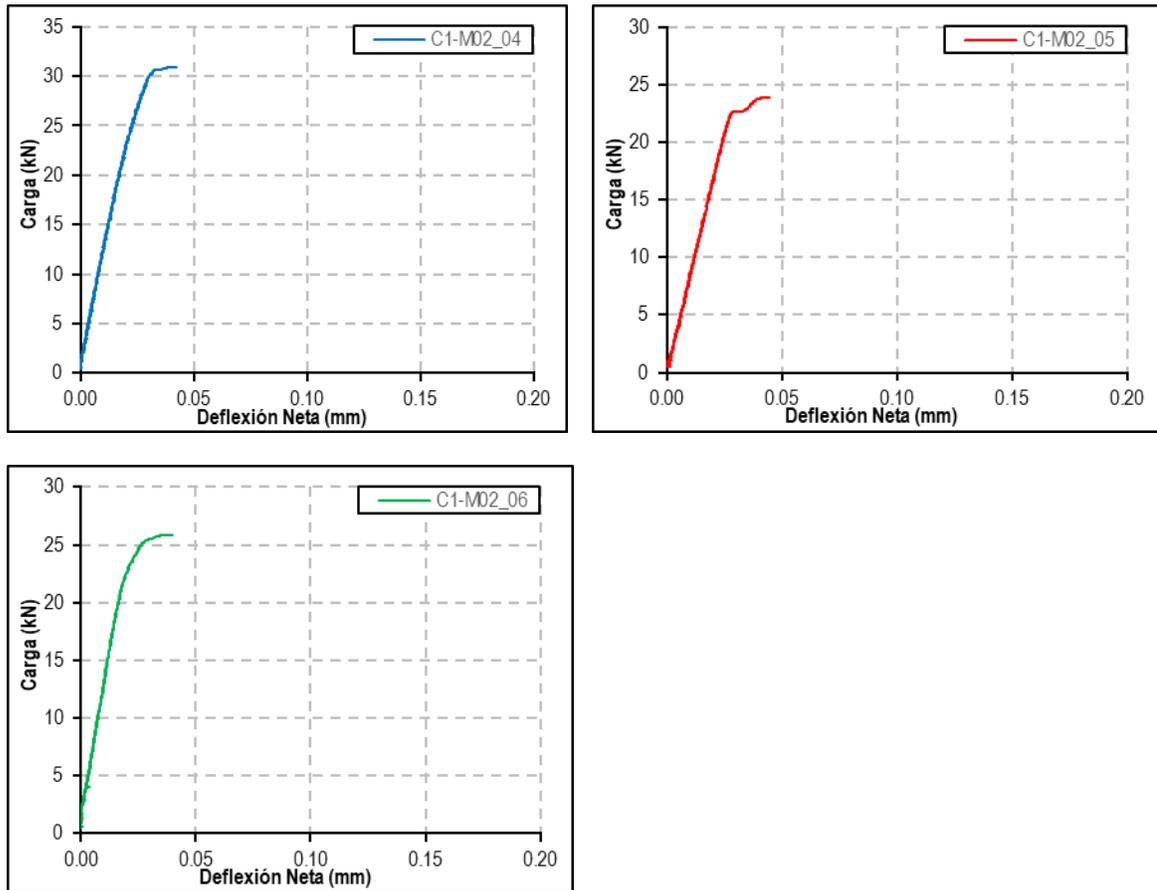
**Carga C1**

**Gráfica E-7:** Curva carga-deflexión Mezcla M01 después de C1.



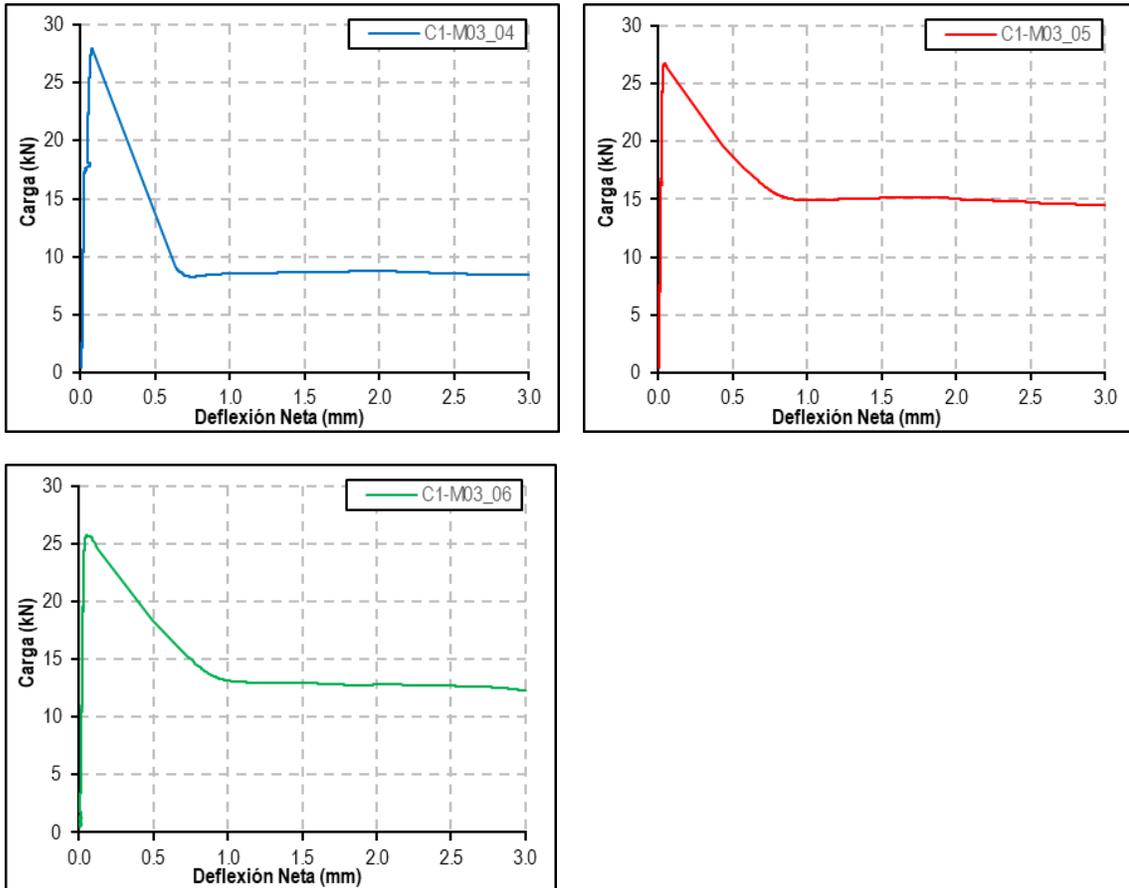
**Tabla E-7:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M01 después de C1.

Parámetros de flexión		Viga			X	S	CV (%)
		_04	_05	_06			
$P_1$	(kN)	24.90	27.52	24.20	25.54	1.43	5.60
$\delta_1$	(mm)	0.049	0.041	0.039	0.04	0.00	9.99
$f_1$	(MPa)	3.01	3.46	3.02	3.16	0.21	6.65
T	(J)	2.12	2.20	2.98	2.44	0.39	16.01
$R_{T,150}^{150}$	(%)	2.84	2.67	4.11	3.21	0.64	20.11

**Gráfica E-8:** Curva carga-deflexión Mezcla M02 después de C1.**Tabla E-8:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M02 después de C1.

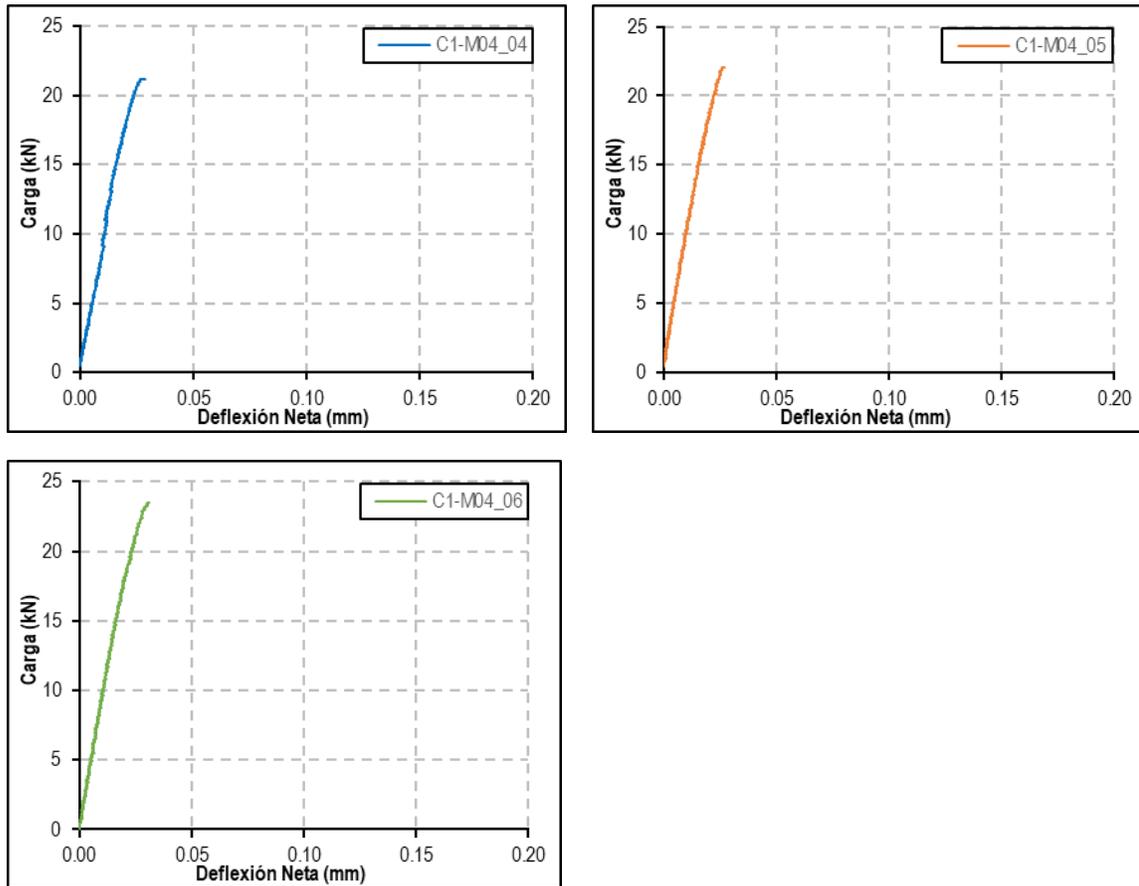
Parámetros de flexión		Viga			X	S	CV (%)
		_04	_05	_06			
$P_1$	(kN)	30.94	23.84	25.89	26.89	2.98	11.09
$\delta_1$	(mm)	0.044	0.045	0.040	0.04	0.00	5.24
$f_1$	(MPa)	3.81	2.96	3.12	3.30	0.37	11.11
J	(T)	2.85	2.17	1.53	2.18	0.54	24.70
$R_{7,150}^{150}$	(%)	3.07	3.03	1.97	2.69	0.51	18.96

**Gráfica E-9:** Curva carga-deflexión Mezcla M03 después de C1.



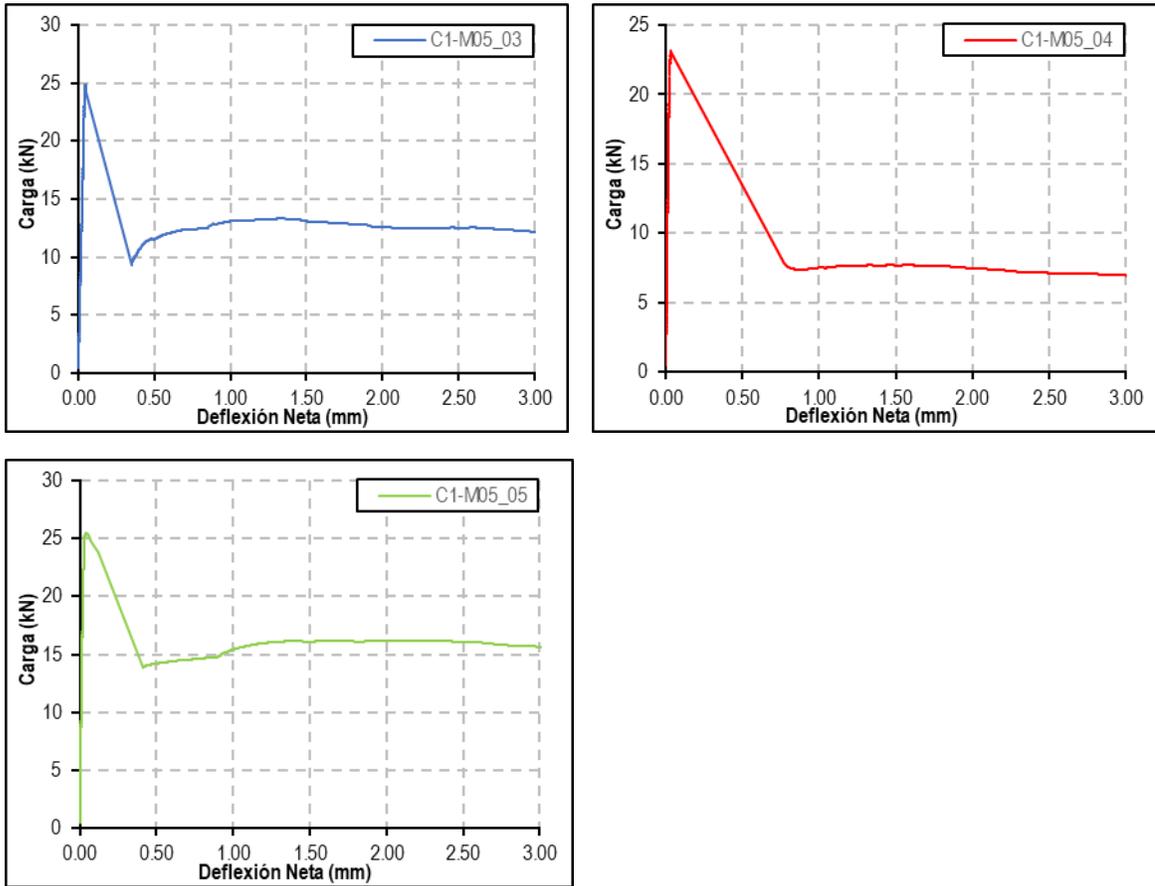
**Tabla E-9:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M03 después de C1.

Parámetros de flexión	Viga			X	S	CV (%)
	_04	_05	_06			
$P_1$ (kN)	27.96	26.69	25.78	26.81	0.89	3.33
$\delta_1$ (mm)	0.078	0.042	0.048	0.06	0.02	28.19
$f_1$ (MPa)	3.43	3.30	3.16	3.30	0.11	3.41
$P_{600}^{150}$ (kN)	8.28	14.90	13.16	12.11	2.80	23.13
$f_{600}^{150}$ (MPa)	1.016	1.841	1.612	1.49	0.35	23.32
$P_{300}^{150}$ (kN)	8.77	15.15	12.82	12.25	2.64	21.56
$f_{300}^{150}$ (MPa)	1.08	1.87	1.57	1.51	0.33	21.80
$P_{150}^{150}$ (kN)	8.43	14.53	12.29439	11.75	2.52	21.44
$f_{150}^{150}$ (MPa)	1.03	1.80	1.51	1.45	0.31	21.69
$T_{150}^{150}$ (J)	33.96	50.75	45.46	43.39	7.01	16.15
$R_{T,150}^{150}$ (%)	40.49	63.38	58.78	54.22	9.89	18.23

**Gráfica E-10:** Curva carga-deflexión Mezcla M04 después de C1.**Tabla E-6-10:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M04 después de C1.

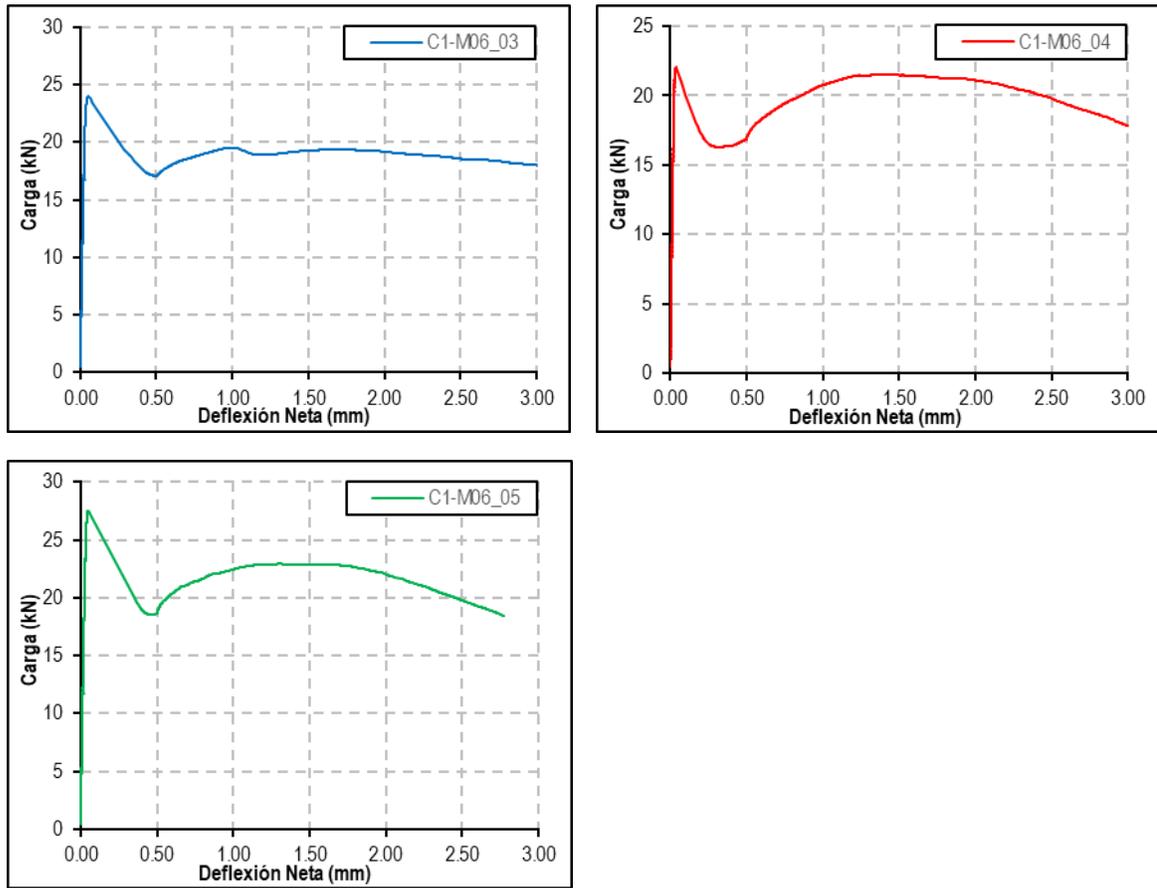
Parámetros de flexión	Viga	X	S	CV (%)
$P_1$ (kN)		22.23	0.99	4.45
$\delta_1$ (mm)		0.03	0.00	8.30
$f_1$ (MPa)		2.75	0.05	1.93
J (T)		1.22	0.21	17.20
$R_{T,150}^{150}$ (%)		1.81	0.23	12.64

**Gráfica E-11:** Curva carga-deflexión Mezcla M05 después de C1.



**Tabla E-6-11:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M05 después de C1.

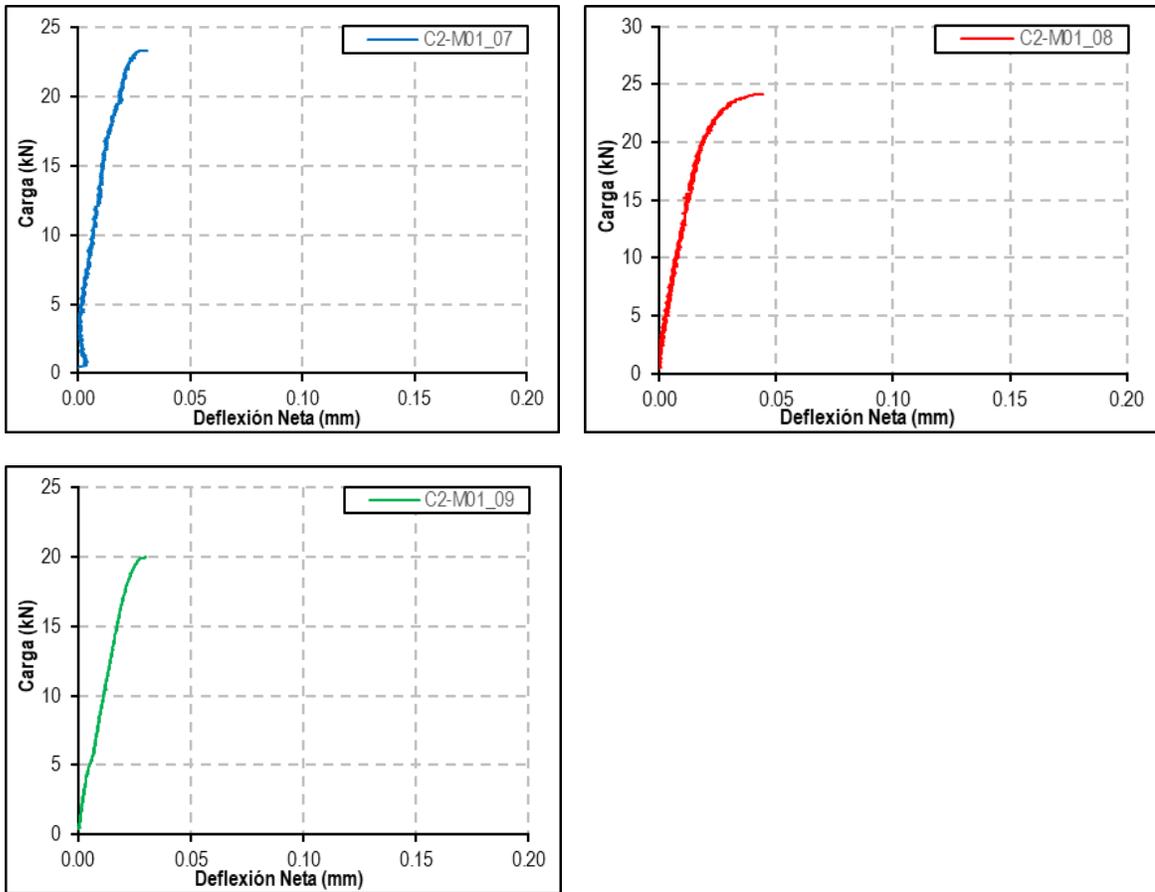
Parámetros de flexión		Viga			X	S	CV (%)
		_03	_04	_05			
$P_1$	(kN)	24.89	23.13	25.48	24.50	1.00	4.08
$\delta_1$	(mm)	0.0470	0.033	0.045	0.04	0.01	15.41
$f_1$	(MPa)	3.21	2.50	2.84	2.85	0.29	10.14
$P_{600}^{150}$	(kN)	12.37	7.88	14.57	11.60	2.79	24.01
$f_{600}^{150}$	(MPa)	1.59	0.85	1.63	1.36	0.36	26.37
$P_{300}^{150}$	(kN)	13.32	7.72	16.21	12.42	3.52	28.37
$f_{300}^{150}$	(MPa)	1.72	0.83	1.81	1.45	0.44	30.21
$P_{150}^{150}$	(kN)	12.12	6.95	15.66	11.58	3.58	30.89
$f_{150}^{150}$	(MPa)	1.56	0.75	1.75	1.35	0.43	31.97
$T_{150}^{150}$	(J)	42.29	30.50	49.70	40.83	7.91	19.37
$R_{T,150}^{150}$	(%)	56.63	43.95	65.01	55.20	8.66	15.69

**Gráfica E-12:** Curva carga-deflexión Mezcla M06 después de C1.**Tabla E-12:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M06 después de C1.

Parámetros de flexión	Viga	Viga			X	S	CV (%)
		_03	_04	_05			
$P_1$	(kN)	23.95	22.03	27.53487	24.51	2.28	9.31
$\delta_1$	(mm)	0.052	0.040	0.047	0.05	0.005	10.71
$f_1$	(MPa)	3.09	2.77	3.45	3.10	0.28	8.94
$P_{600}^{150}$	(kN)	18.74	19.45	21.38	19.86	1.12	5.62
$f_{600}^{150}$	(MPa)	2.42	2.44	2.68	2.51	0.12	4.62
$P_{300}^{150}$	(kN)	19.36	21.46	22.89	21.24	1.45	6.82
$f_{300}^{150}$	(MPa)	2.50	2.70	2.86	2.69	0.15	5.58
$P_{150}^{150}$	(kN)	17.98	17.76	17.31	17.69	0.28	1.56
$f_{150}^{150}$	(MPa)	2.32	2.23	2.17	2.24	0.06	2.78
$T_{150}^{150}$	(J)	57.95	61.33	65.19	61.49	2.96	4.81
$R_{T,150}^{150}$	(%)	80.65	92.80	78.92	84.12	6.17	7.34

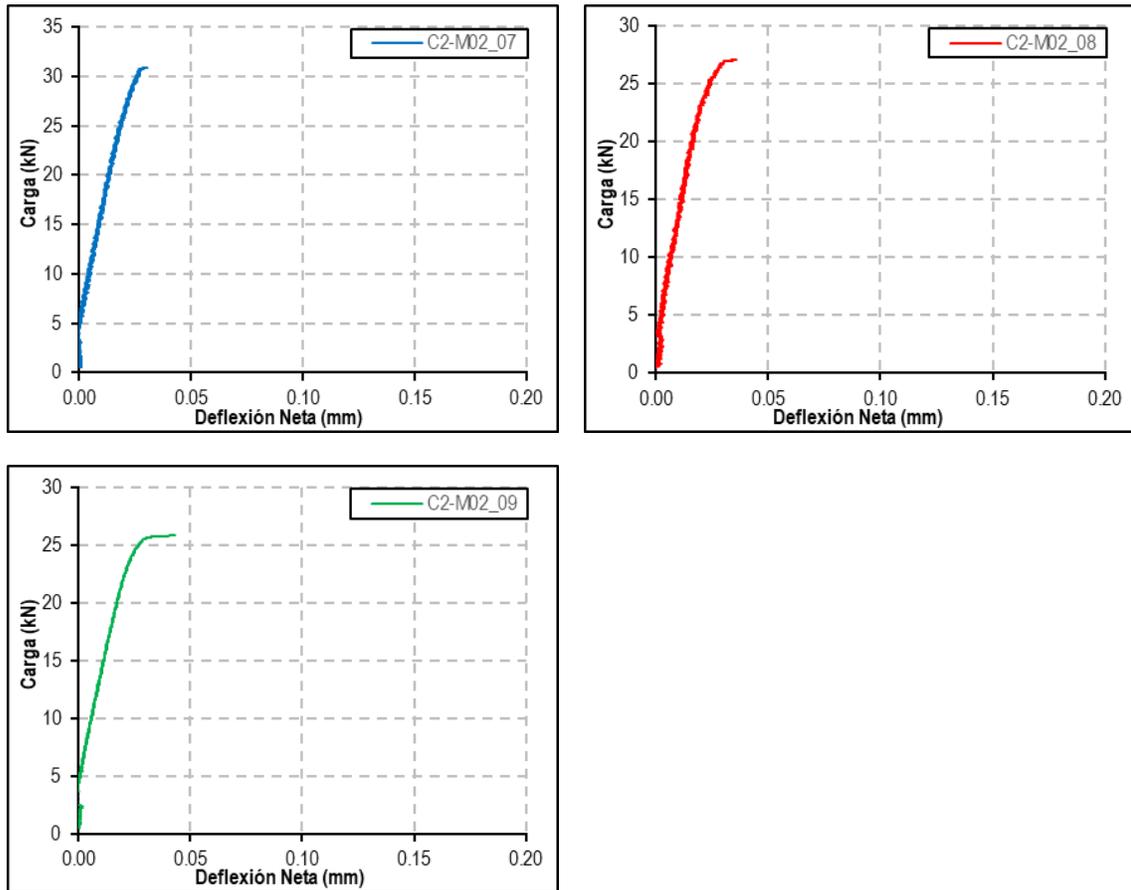
**Carga C2**

**Gráfica E-13:** Curva carga-deflexión Mezcla M01 después de C2.



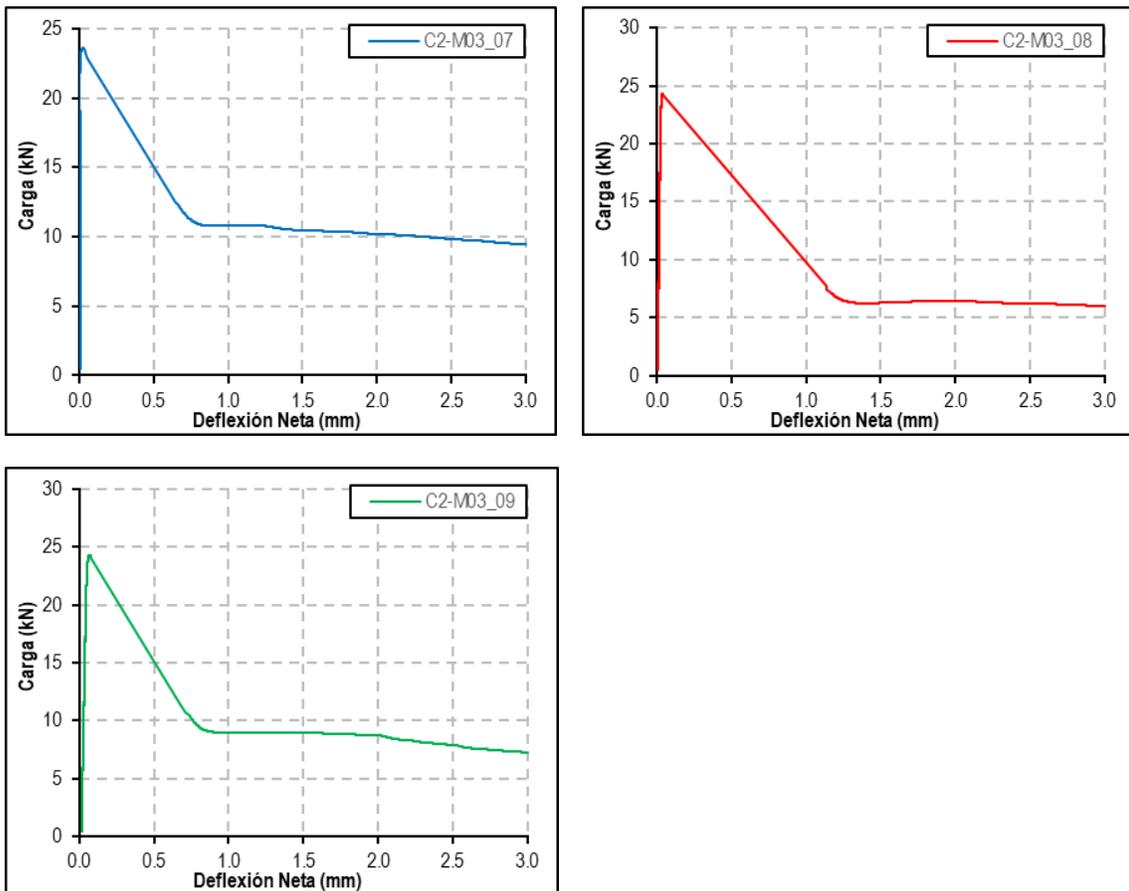
**Tabla E-13:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M01 después de C2.

Parámetros de flexión	Viga	X	S	CV (%)
$P_1$ (kN)		22.50	1.81	8.04
$\delta_1$ (mm)		0.03	0.01	19.00
$f_1$ (MPa)		2.75	0.27	9.65
J (T)		2.72	1.03	37.87
$R_{T,150}^{150}$ (%)		3.92	1.27	32.26

**Gráfica E-14:** Curva carga-deflexión Mezcla M02 después de C2.**Tabla E-14:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M02 después de C2.

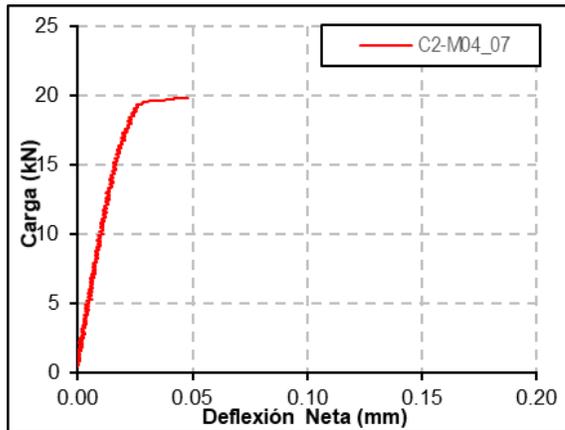
Parámetros de flexión	Viga	Viga			X	S	CV (%)
		_07	_08	_09			
$P_1$	(kN)	30.86	27.10	25.93	27.97	2.10	7.52
$\delta_1$	(mm)	0.030	0.034	0.052	0.04	0.01	24.39
$f_1$	(MPa)	3.75	3.33	3.10	3.39	0.27	7.92
J	(T)	6.50	5.13	2.21	4.61	1.79	38.85
$R_{7,150}^{150}$	(%)	7.02	6.30	2.84	5.39	1.83	33.94

**Gráfica E-15:** Curva carga-deflexión Mezcla M03 después de C2.



**Tabla E-15:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M03 después de C2.

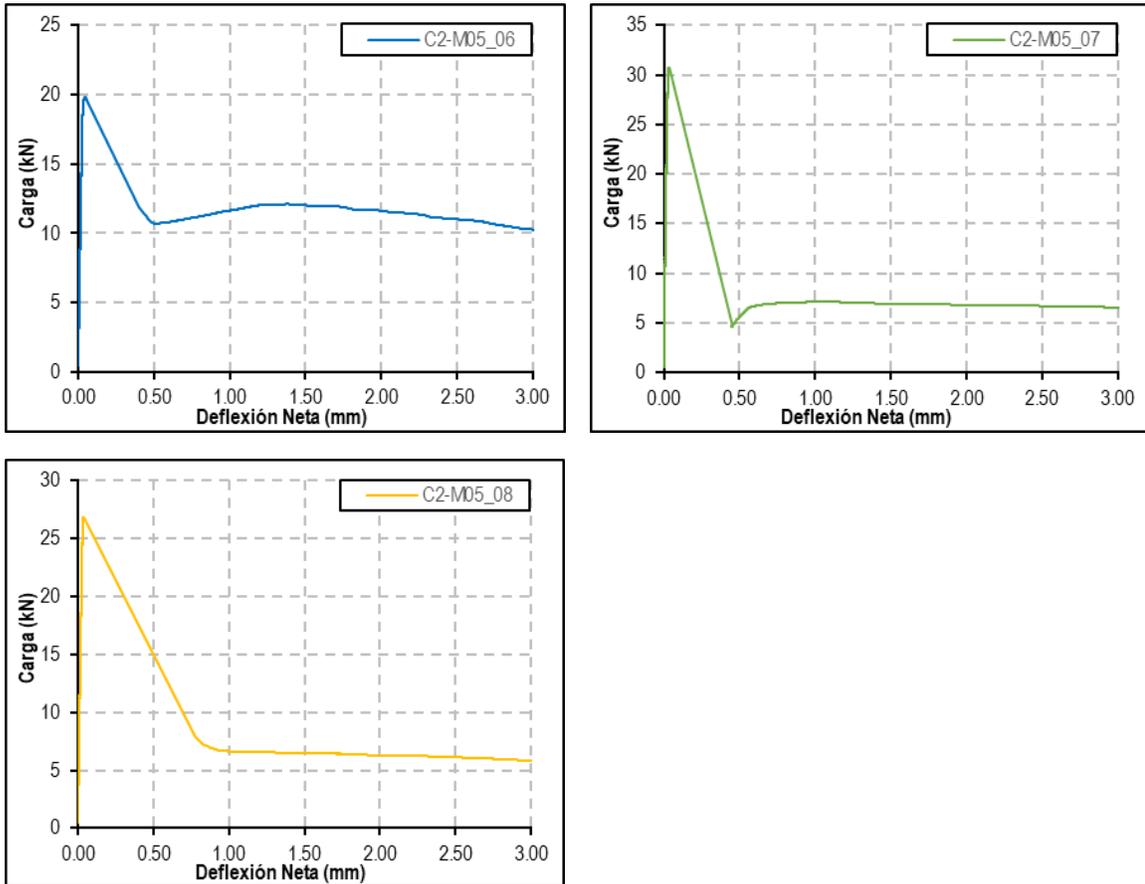
Parámetros de flexión	Viga			X	S	CV (%)
	_04	_05	_06			
$P_1$ (kN)	23.62	24.33	24.2421	24.06	0.31	1.30
$\delta_1$ (mm)	0.0253	0.037	0.067431	0.04	0.02	41.20
$f_1$ (MPa)	2.89	2.92	3.02	2.94	0.05	1.80
$P_{600}^{150}$ (kN)	11.21	6.40	10.10	9.24	2.06	22.25
$f_{600}^{150}$ (MPa)	1.37	0.77	1.26	1.13	0.26	23.08
$P_{300}^{150}$ (kN)	10.46	6.40	8.99	8.62	1.68	19.44
$f_{300}^{150}$ (MPa)	1.28	0.77	1.12	1.06	0.21	20.19
$P_{150}^{150}$ (kN)	9.43	5.99	7.247204	7.55	1.42	18.84
$f_{150}^{150}$ (MPa)	1.15	0.72	0.90	0.92	0.18	19.30
$T_{150}^{150}$ (J)	36.67	31.45	32.78	33.63	2.21	6.59
$R_{T,150}^{150}$ (%)	51.74	43.09	45.07	46.63	3.70	7.93

**Gráfica E-16:** Curva carga-deflexión Mezcla M04 después de C2.**Tabla E-16:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M04 después de C2.

Parámetros de flexión		Viga _07
$P_1$	(kN)	19.79
$\delta_1$	(mm)	0.0480
$f_1$	(MPa)	2.46
J	(T)	2.32
$R_{T,150}^{150}$	(%)	3.90

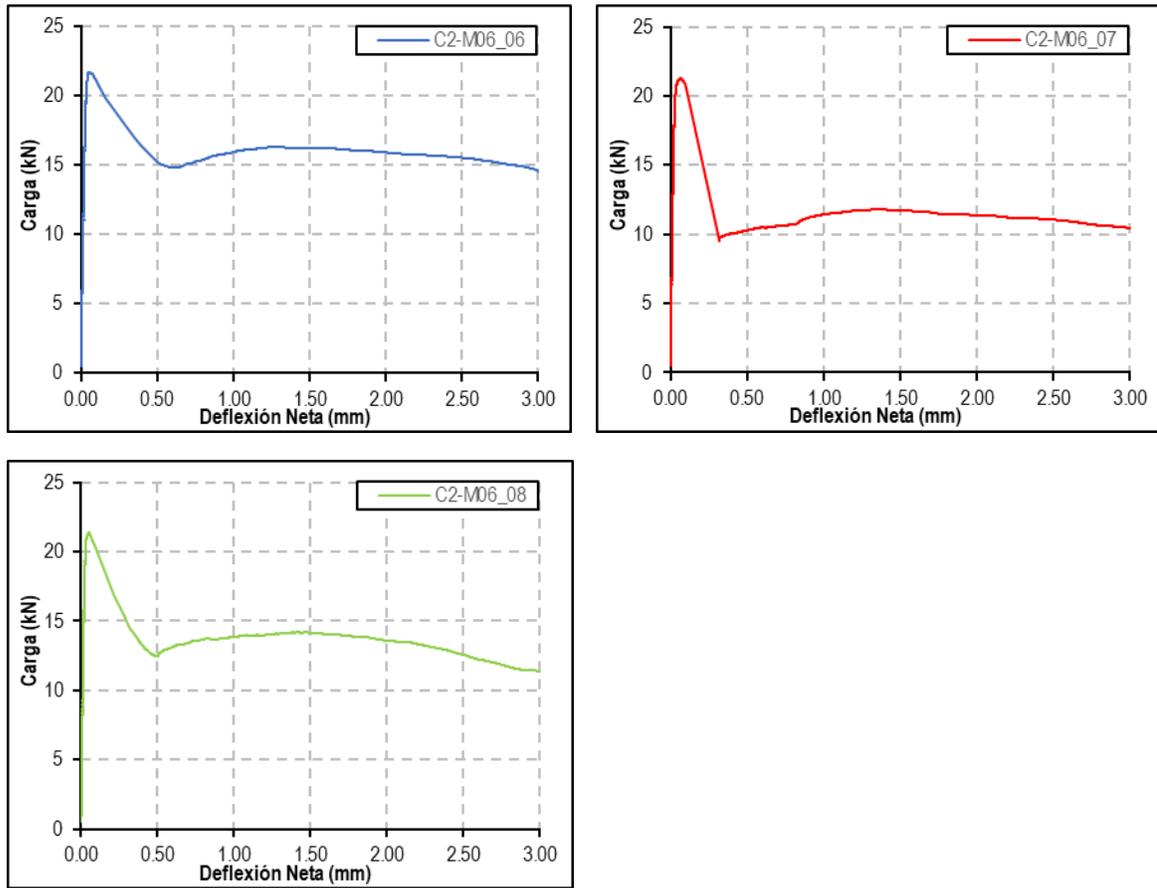
**Nota:** La viga C2\_M04\_08 falló en el ciclo número 71.

**Gráfica E-17:** Curva carga-deflexión Mezcla M05 después de C2.



**Tabla E-17:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M05 después de C2.

Parámetros de flexión	Viga	Viga			X	S	CV (%)
		_06	_07	_08			
$P_1$	(kN)	19.81	30.73	26.85	25.79	4.52	17.52
$\delta_1$	(mm)	0.044	0.032	0.03656	0.04	0.01	13.88
$f_1$	(MPa)	2.28	3.77	3.40	3.15	0.63	20.12
$P_{600}^{150}$	(kN)	11.11	6.99	7.91	8.67	1.77	20.37
$f_{600}^{150}$	(MPa)	1.28	0.86	1.00	1.05	0.17	16.69
$P_{300}^{150}$	(kN)	12.09	7.12	6.48	8.56	2.51	29.31
$f_{300}^{150}$	(MPa)	1.39	0.87	0.82	1.03	0.26	25.01
$P_{150}^{150}$	(kN)	10.25	6.50	5.80	7.52	1.95	25.99
$f_{150}^{150}$	(MPa)	1.18	0.80	0.74	0.90	0.20	21.70
$T_{150}^{150}$	(J)	36.37	27.14	29.14	30.88	3.96	12.84
$R_{T,150}^{150}$	(%)	61.20	29.44	36.18	42.27	13.66	32.32

**Gráfica E-18:** Curva carga-deflexión Mezcla M06 después de C2.**Tabla E-18:** Resumen de parámetros de flexión en vigas mezcla M06 después de C2.

Parámetros de flexión	Viga			X	S	CV (%)	
	_06	_07	_08				
$P_1$	(kN)	21.68	21.27	21.38	21.44	0.18	0.82
$\delta_1$	(mm)	0.051	0.064	0.052782	0.06	0.01	10.41
$f_1$	(MPa)	2.74	2.71	2.70	2.72	0.02	0.68
$P_{600}^{150}$	(kN)	15.26	10.66	13.56	13.16	1.90	14.43
$f_{600}^{150}$	(MPa)	1.93	1.36	1.71	1.67	0.24	14.16
$P_{300}^{150}$	(kN)	16.34	11.79	14.20	14.11	1.86	13.17
$f_{300}^{150}$	(MPa)	2.07	1.50	1.79	1.79	0.23	12.91
$P_{150}^{150}$	(kN)	14.61	10.46	11.39	12.15	1.78	14.62
$f_{150}^{150}$	(MPa)	1.85	1.33	1.44	1.54	0.22	14.43
$T_{150}^{150}$	(J)	49.07	35.61	43.05	42.58	5.50	12.93
$R_{T,150}^{150}$	(%)	75.44	55.82	67.13	66.13	8.04	12.16

## **Anexo F: Ensayo de Ultrasonido**

**Nota:** Para los primeros registros de velocidades que se obtuvieron se localizaron los transductores a una distancia "L" (largo) de las vigas, sin embargo, se identificó que estos datos no se obtenían fácilmente ya que el equipo no convergía, se prefirió por lo tanto registrar los datos con una distancia menor colocando los transductores en la cara opuesta paralela al ancho del elemento como se indicó en las tablas F-1 a F-12.



**Tabla F-1:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C1 – M01

Ensayo	M01_04				M01_05				M01_06			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	118.4	4586	120.7	4499	130.7	4162	117.9	4614	152.1	3570	141.2	3846
2	118.4	4586	153.9	3528	115.6	4706	117.9	4614	119.7	4536	151.6	3582
3	119.9	4529	121.1	4484	151.9	3581	151.4	3593	126.2	4303	119.6	4540
4	119.9	4529	127.1	4272	125.6	4331	152.6	3565	119.6	4540	119.6	4540
5	120.4	4510	140.9	3854	117.1	4646	154.2	3528	131.4	4132	119.7	4536
6	118.4	4586	121.4	4473	117.6	4626	115.6	4706	131.2	4139	119.4	4548
7	118.7	4575	121.6	4465	117.6	4626	144.7	3760	131.1	4142	119.6	4540
8	118.1	4598	128.4	4229	127.4	4270	156.4	3478	126.1	4306	119.9	4529
9	121.4	4473	130.9	4148	128.2	4243	152.7	3563	125.4	4330	119.7	4536
10	118.4	4586	126.7	4286	128.7	4227	157.4	3456	119.7	4536	119.9	4529
Promedio	119.2	4556	129.3	4224	126	4342	142	3888	128	4253	125	4373
S	1.06	40	10.09	299	10.18	320	16.66	502	9.13	276	10.94	335
CV(%)	0.9%	0.9%	7.8%	7.1%	8.1%	7.4%	11.7%	12.9%	7.1%	6.5%	8.8%	7.7%

**Tabla F-2:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C2 – M01

Ensayo	M01_07				M01_08				M01_09			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	148.4	3659	144.4	3760	120.1	4513	154.2	3515	122.1	4447	121.9	4454
2	119.4	4548	146.1	3717	152.4	3556	152.7	3549	127.6	4255	144.7	3753
3	119.2	4555	143.1	3795	119.3	4543	125.2	4329	122.1	4447	130.9	4148
4	119.6	4540	145.6	3729	120.4	4502	153.4	3533	120.6	4502	130.6	4158
5	119.4	4548	142.4	3813	120.1	4513	118.2	4585	121.2	4480	120.7	4499
6	119.4	4548	143.4	3787	120.3	4505	129.9	4172	120.9	4491	120.7	4499
7	119.2	4555	142.4	3813	119.4	4539	129.9	4172	120.7	4499	121.9	4454
8	119.1	4559	119.4	4548	119.4	4539	131.1	4134	118.6	4578	118.9	4567
9	118.9	4567	129.2	4203	120.4	4502	129.1	4198	118.6	4578	127.1	4272
10	143.4	3787	119.1	4559	119.1	4551	124.9	4339	121.4	4473	121.9	4454
Promedio	124.6	4387	137.5	3972	123	4426	135	4053	121	4475	126	4326
S	10.71	333	10.18	319	9.78	291	12.66	362	2.38	85	7.44	236
CV(%)	8.6%	7.6%	7.4%	8.0%	7.9%	6.6%	9.4%	8.9%	2.0%	1.9%	5.9%	5.5%

**Tabla F-3:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C1 – M02

Ensayo	M02_04				M02_05				M02_06			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	34.1	4633	41.6	3798	34.1	4575	35.2	4432	34.4	4593	34.7	4553
2	35.1	4501	39.6	3990	34.4	4535	35.2	4432	34.2	4620	38.9	4062
3	35.7	4426	40.1	3940	34.4	4535	35.1	4444	34.6	4566	35.1	4501
4	40.4	3911	40.1	3940	34.2	4561	35.4	4407	34.4	4593	43.2	3657
5	35.9	4401	41.1	3844	34.4	4535	34.6	4509	41.1	3844	34.2	4620
6	35.6	4438	40.6	3892	34.9	4470	36.2	4309	39.7	3980	39.4	4010
7	43.4	3641	40.6	3892	35.2	4432	35.2	4432	34.6	4566	33.2	4759
8	40.1	3940	40.7	3882	39.4	3959	35.2	4432	34.6	4566	33.9	4661
9	40.7	3882	40.5	3901	38.9	4010	35.1	4444	33.7	4688	33.2	4759
10	44.4	3559	40.7	3882	35.1	4444	36.2	4309	34.2	4620	34.4	4593
Promedio	38.54	4133	40.6	3896	36	4406	35	4415	36	4464	36	4418
S	3.52	369	0.53	50	1.86	216	0.47	58	2.46	280	3.17	355
CV(%)	9.1%	8.9%	1.3%	1.3%	5.2%	4.9%	1.3%	1.3%	6.9%	6.3%	8.8%	8.0%

**Tabla F-4:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C2 – M02

Ensayo	M02_07				M02_08				M02_09			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	37.9	4116	32.9	4742	34.7	4582	33.9	4690	34.2	4678	33.9	4720
2	38.7	4031	32.7	4771	35.1	4530	34.4	4622	34.2	4678	33.4	4790
3	37.4	4171	32.4	4815	34.9	4556	34.2	4649	34.6	4624	33.4	4790
4	37.6	4149	33.4	4671	34.7	4582	45.4	3502	33.9	4720	33.4	4790
5	32.9	4742	33.1	4713	35.1	4530	34.6	4595	34.4	4651	33.9	4720
6	32.4	4815	33.1	4713	34.1	4663	38.9	4087	34.6	4624	33.9	4720
7	31.2	5000	37.6	4149	44.7	3557	38.6	4119	34.6	4624	33.9	4720
8	32.2	4845	37.2	4194	34.1	4663	38.6	4119	33.4	4790	33.9	4720
9	32.7	4771	37.4	4171	37.9	4195	38.6	4119	34.2	4678	33.9	4720
10	32.6	4785	33.9	4602	34.2	4649	33.6	4732	33.4	4790	34.4	4651
Promedio	34.56	4542	34.4	4554	36	4451	37	4324	34	4686	34	4734
S	2.78	355	2.02	256	3.10	324	3.51	378	0.43	60	0.30	42
CV(%)	8.0%	7.8%	5.9%	5.6%	8.6%	7.3%	9.5%	8.7%	1.3%	1.3%	0.9%	0.9%

**Tabla F-5:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C1 – M03

Ensayo	M03_04				M03_05				M03_06			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	33.1	4713	34.4	4535	34.1	4575	33.4	4671	34.4	4564	35.2	4460
2	33.1	4713	34.4	4535	34.9	4470	33.4	4671	34.4	4564	36.9	4255
3	33.7	4629	34.6	4509	34.6	4509	34.1	4575	34.7	4524	36.1	4349
4	38.6	4041	34.6	4509	34.9	4470	33.6	4643	34.7	4524	35.2	4460
5	39.6	3939	34.5	4522	34.1	4575	33.4	4671	33.9	4631	35.4	4435
6	33.2	4699	34.6	4509	34.7	4496	33.4	4671	34.1	4604	36.1	4349
7	33	4727	34.3	4548	40.4	3861	33.1	4713	34.4	4564	36.1	4349
8	32.9	4742	34.3	4548	34.1	4575	33.4	4671	34.1	4604	35.2	4460
9	33.4	4671	34.6	4509	34.9	4470	33.7	4629	34.1	4604	36	4361
10	33.9	4602	34.5	4522	34.9	4470	39.2	3980	34.7	4524	36.1	4349
Promedio	34.45	4548	34.5	4524	35	4447	34	4589	34	4571	36	4383
S	2.35	283	0.12	15	1.78	200	1.73	206	0.28	37	0.53	65
CV(%)	6.8%	6.2%	0.3%	0.3%	5.1%	4.5%	5.1%	4.5%	0.8%	0.8%	1.5%	1.5%

**Tabla F-6:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C2 – M03

Ensayo	M03_07				M03_08				M03_09			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	34.1	4692	35.1	4558	33.6	4643	33.9	4602	36.1	4349	35.4	4435
2	34.2	4678	39.9	4010	33.6	4643	40.9	3814	39.7	3955	35.7	4398
3	34.4	4651	42.2	3791	33.4	4671	40.6	3842	36.1	4349	35.4	4435
4	34.2	4678	45.1	3548	33.7	4629	43.4	3594	36.1	4349	40.9	3839
5	33.7	4748	34.7	4611	34.2	4561	34.7	4496	35.9	4373	35.6	4410
6	33.7	4748	33.4	4790	34.1	4575	40.4	3861	36.1	4349	41.1	3820
7	43.1	3712	38.4	4167	34.6	4509	42.2	3697	36.7	4278	41.4	3792
8	36.6	4372	38.2	4188	34.9	4470	39.9	3910	39.7	3955	40.7	3857
9	36.7	4360	33.4	4790	39.4	3959	40.2	3881	35.9	4373	35.4	4435
10	43.9	3645	41.9	3819	33.9	4602	34.2	4561	36.7	4278	40.2	3905
Promedio	36.46	4428	38.2	4227	35	4526	39	4026	37	4261	38	4133
S	3.67	398	3.85	420	1.68	198	3.28	357	1.43	156	2.70	291
CV(%)	10.1%	9.0%	10.1%	9.9%	4.9%	4.4%	8.4%	8.9%	3.9%	3.7%	7.1%	7.1%



**Tabla F-9:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C1 – M05

Ensayo	M05_03				M05_04				M05_05			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	33.1	4543	33.2	4529	36.1	4377	35.6	4438	35.6	4430	34.2	4611
2	33.6	4475	33.9	4436	36.1	4377	35.4	4463	33.9	4652	35.9	4393
3	33.9	4436	33.9	4436	35.9	4401	35.4	4463	34.2	4611	35.7	4418
4	33.9	4436	33.9	4436	36.4	4341	35.4	4463	36.4	4333	36.1	4369
5	33.9	4436	39.4	3816	36.2	4365	35.7	4426	36.2	4357	35.9	4393
6	33.9	4436	33.4	4502	35.9	4401	35.9	4401	36.1	4369	36.2	4357
7	33.9	4436	39.6	3797	36.9	4282	36.2	4365	36.3	4345	36.4	4333
8	33.9	4436	33.2	4529	44.7	3535	35.7	4426	34.6	4558	36.2	4357
9	33.6	4475	42.2	3563	41.1	3844	35.7	4426	35.9	4393	36.2	4357
10	33.6	4475	33.4	4502	36.2	4365	35.4	4463	35.6	4430	36.4	4333
Promedio	33.73	4458	35.6	4255	38	4229	36	4433	35	4448	36	4392
S	0.25	33	3.22	354	2.81	280	0.25	31	0.87	111	0.61	78
CV(%)	0.7%	0.7%	9.1%	8.3%	7.5%	6.6%	0.7%	0.7%	2.4%	2.5%	1.7%	1.8%

**Tabla F-10:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C2 – M05

Ensayo	M05_06				M05_07				M05_08			
	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> (μs)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> (μs)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	34.9	4666	34.7	4693	37.1	4267	35.6	4447	35.6	4306	36.7	4177
2	35.4	4600	34.9	4666	36.2	4373	35.6	4447	34.7	4417	35.9	4270
3	35.4	4600	34.9	4666	36.6	4325	35.7	4434	34.9	4392	35.9	4270
4	35.7	4561	35.2	4626	36.4	4349	35.9	4409	34.6	4430	35.4	4330
5	35.6	4574	35.1	4639	36.4	4349	35.9	4409	32.9	4659	35.6	4306
6	36.1	4511	35.1	4639	36.4	4349	35.4	4472	33.7	4549	35.7	4294
7	35.4	4600	34.9	4666	36.7	4313	35.9	4409	34.2	4482	35.1	4367
8	36.6	4449	34.9	4666	36.2	4373	35.8	4422	32.7	4688	35.4	4330
9	36.1	4511	34.8	4679	36.7	4313	35.9	4409	32.6	4702	35.4	4330
10	35.9	4536	34.9	4666	36.7	4313	35.7	4434	33.2	4617	35.2	4355
Promedio	35.71	4561	34.9	4661	37	4332	36	4429	34	4524	36	4303
S	0.46	58	0.14	19	0.26	31	0.16	20	0.99	131	0.44	52
CV(%)	1.3%	1.3%	0.4%	0.4%	0.7%	0.7%	0.5%	0.5%	2.9%	2.9%	1.2%	1.2%

**Tabla F-11:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C1 – M06

Ensayo	M06_03				M06_04				M06_05			
	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	35.7	4282	72.9	2097	36.1	4304	37.7	4121	35.4	4368	35.9	4307
2	42.9	3563	43.4	3522	36.4	4268	37.4	4154	35.6	4344	35.4	4368
3	51.4	2974	59.4	2574	36.2	4292	37.9	4099	35.3	4380	35.7	4331
4	42.1	3631	59.3	2578	36.9	4211	37.9	4099	35.4	4368	36.1	4283
5	42.6	3589	51.4	2974	35.9	4328	37.4	4154	35.2	4393	35.6	4344
6	42.1	3631	40.9	3738	35.9	4328	37.9	4099	34.9	4431	35.4	4368
7	35.1	4355	45.9	3331	35.9	4328	38.7	4015	36.1	4283	35.4	4368
8	55.9	2735	51.4	2974	35.8	4340	38.4	4046	36.1	4283	35.4	4368
9	42.6	3589	49.7	3076	35.9	4328	38.2	4067	36.2	4272	35.4	4368
10	51.9	2946	34.2	4470	35.9	4328	37.7	4121	36.1	4283	35.6	4344
Promedio	44.23	3529	50.9	3133	36	4305	38	4098	36	4341	36	4345
S	6.47	506	10.43	640	0.32	38	0.39	42	0.44	53	0.23	28
CV(%)	14.6%	14.3%	20.5%	20.4%	0.9%	0.9%	1.0%	1.0%	1.2%	1.2%	0.7%	0.7%

**Tabla F-12:** Tiempo de llegada de onda ultrasónica, velocidad de propagación Pre y Post carga C2 – M06

Ensayo	M06_06				M06_07				M06_08			
	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)	t <sub>PRE</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>PRE</sub> (m/s)	t <sub>POST</sub> ( $\mu$ S)	V <sub>POST</sub> (m/s)
1	38.1	4093	38.1	4093	35.9	4327	34.6	4489	32.2	4839	36.4	4281
2	38.1	4093	38.2	4083	35.4	4388	34.7	4476	37.1	4200	36.4	4281
3	38.2	4083	39.1	3989	31.6	4916	34.3	4529	36.1	4316	44.7	3486
4	37.9	4115	39.4	3958	31.1	4995	35.1	4425	35.9	4341	33.7	4624
5	37.7	4137	39.9	3909	33.8	4596	34.9	4451	36.9	4223	44.6	3494
6	37.9	4115	38.6	4040	35.2	4413	34.2	4542	44.9	3470	44.4	3510
7	37.6	4148	38.7	4030	35.5	4376	34.1	4555	41.1	3791	44.6	3494
8	38.4	4061	38.4	4061	35.9	4327	34.1	4555	43.4	3590	44.7	3486
9	38.5	4051	39.4	3958	36.2	4291	33.9	4582	41.3	3773	35.9	4341
10	38.4	4061	39.4	3958	32.9	4721	33.9	4582	44.1	3533	36.9	4223
Promedio	38.08	4096	38.9	4008	34	4535	34	4519	39	4008	40	3922
S	0.29	31	0.57	59	1.79	246	0.40	52	4.02	421	4.44	440
CV(%)	0.8%	0.8%	1.5%	1.5%	5.2%	5.4%	1.2%	1.2%	10.2%	10.5%	11.0%	11.2%

## Bibliografía

- ACI Committee 211. (1991). Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, and mass concrete. *Fermington Hills: American Concrete Institute, Reapproved.*
- ACI Committee 221. (1998). State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity. *Fermington Hills: American Concrete Institute, 98(Reapproved), 1–31.*
- ACI Committee 228.2R. (2013). Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. In *Fermington Hills: American Concrete Institute.*
- ACI Committee 318 (2019). Requisitos de Reglamentos para Concreto Estructural (ACI 318-19), Fermington Hills: American Concrete Institute 683 (2019).  
<https://www.udocz.com/apuntes/53414/aci-318-19-espanol>
- ACI Committee 544.1R. (2009). Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544. In *Fermington Hills: American Concrete Institute* (Vol. 96, Issue Reapproved).
- ACI Committee 544.2R. (2017). Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete. *Fermington Hills: American Concrete Institute.*
- ACI Committee 544.3R. (2008). Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete. *Fermington Hills: American Concrete Institute, 1–16.*
- ACI Committee 544.4R. (2018). Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete. In *Fermington Hills: American Concrete Institute.*
- ACI Committee 544.5R. (2010). Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. In *Fermington Hills: American Concrete Institute.*
- ACI Committee 544.8R. (2016). Report on Indirect Method to Obtain Stress Strain Response of Fiber- Reinforced Concrete (FRC). *Fermington Hills: American Concrete Institute.*
- ASTM A820/A820M. (2011). Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete. *American Society for Testing and Material., October, 1–4.*
- ASTM C1116/C1116M. (2010). Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. *American Society for Testing and Material., Reapproved 2015, 1–7.*

- ASTM C1399/C1399M. (2010). Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete. *American Society for Testing and Material.*, 1–6.
- ASTM C1557. (2014). Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. *American Society for Testing and Material.*, 75(Reapproved 1989), 1–5.
- ASTM C1609/C1609M. (2010). Standar Test Method for flexural Performance of Fiber - Reinforced Concreten (Using Beam With Third - Point Loading). *American Society for Testing and Material.*
- ASTM C293/C293M. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). *American Society for Testing and Material.*, 1–4.
- ASTM C469/C469M. (2022). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *American Society for Testing and Material.*
- ASTM C597. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. *American Society for Testing and Material.*, 04(02), 3–6.
- Abousnina, R., Premasiri, S., Anise, V., Lokuge, W., Vimonsatit, V., Ferdous, W., & Alajarmeh, O. (2021). Mechanical properties of macro polypropylene fibre-reinforced concrete. *Polymers*, 13(23), 1–25.
- Ali, B., Ali L., Kurda R. (2020). Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement. *Composites Communications*, 22, 100437.
- Arivalagan, S. (2012). Cyclic behaviour of reinforced cement concrete composite beam made with polypropylene fiber. *Journal of Civil Engineering*, 40(2), 105–114.
- Aslani, F. & Samali, B., (2014). High Strenth Polypropylene Fibre Reinforcement Concrete at High Temperature. *Fire Technology*, 50, 1229-1247.
- Behdoui, Z., Jamshidi, M., Latifi, M., & Halvaei, M. (2013). Effect of cross sectional shape of polypropylene fibers on flexural toughness of composites and fiber-to-cement matrix adhesion. *Advanced Materials Research*, 687, 485–489.
- Benaicha, M., Jalbaud, O., Hafidi Alaoui, A., & Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 702–709.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). Fibre reinforced cementitious composites. In *Modern Concrete Technology Series*.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Amziane, S. (2016). Behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253-262.
- Broda, J., & Brachaczek, W. (2015). Influence of polypropylene fibre geometry on the

- mechanical properties of cement mortars. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 23(2), 123–129.
- BS-EN-14889-2:2006. (2006). Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity. In *BSI* (Vol. 3).
- Bunsell, A. R. (2018). *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres, Second Edition*.
- Buratti, N., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 25, 2713–2722.
- Cáceres, A., Galobardes, I., & De Figueiredo, A. D. (2016). Mechanical characterization of synthetic macrofibres. *Materials Research*, 19(3), 711–720.
- Cáceres, A., Galobardes, I., Rebmann, M. S., Monte, R., & Figueiredo, A. D. de. (2015). Geometric characterization of polymeric macrofibers. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8(5), 644–668.
- Carmona, S., Aguado De Cea, A., Molins, C., & Contreras, M. (2009). Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona). *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(2), 119–140.
- Carnovale, D. (2013). Behaviour and Analysis of Steel and Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Loading: A Pilot Investigation. [Thesis of Master, University of Toronto].
- Carrillo, J., Aperador, W., & Gonzáles, G. (2012). Correlaciones entre las Propiedades Mecánicas del Concreto Reforzado con Fibras de Acero. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumnes XIV (número 3), julio-septiembre 2013: 435-450.
- Carrillo, J., Ramirez, J., & Lizarazo, J. (2019). Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Fiber-Reinforced Concrete in Colombia from Ultrasonic Pulse Velocities. *Journal of Building Engineering*. 23 (2019) 18-26.
- Del Savio, A., La Torre, D., Carrillo, J., & Chi, E. (2022). Determination of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete Compressive Strength and Elasticity Modulus via Ultrasonic Pulse Tests. *Appl. Sci.* 2022, 12, 10375.
- Dopko, M., Najimi, M., Shafei, B., Wang, X., Taylor, P., & Phares, B. M. (2018). Flexural performance evaluation of fiber-reinforced concrete incorporating multiple macro-synthetic fibers. *Transportation Research Record*, 2672(27), 1–12.
- Euclid Chemical Company, (2015). Engineering Guide to Fiber-Reinforced Concrete.
- Fib, (2010). Model code for concrete structures 2010. Federation Internationale du Beton.
- Figueiredo, A. D. (2008). A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto. *Anais Do 50° Congresso Brasileiro Do Concreto, September 2008*.

- Ghosni, N., Samali, B., & Vessalas, K. (2014). Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading. *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 319–326.
- Hannant, D.J. (1978). *Fiber Cements and Fiber Concretes*. John Wiley and Sons.
- Método de ensayo para la determinación de la capacidad de absorción de energía (tenacidad) de concreto reforzado con fibra, (2009).
- International Atomic Energy Agency. (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. In *Industrial Applications and Chemistry Section, IAEA* (Vol. 17). [http://200.10.161.33/cirsoc/pdf/ensayos/tcs-17\\_web.pdf](http://200.10.161.33/cirsoc/pdf/ensayos/tcs-17_web.pdf)
- Karaiskos, G., Deraemaeker, A., Aggelis, D. G., & Van Hemelrijck, D. (2015). Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. *Smart Materials and Structures*, 24(11), 1–31.
- Kobayashi, K., & Cho, R. (1981). Flexural behaviour of polyethylene fibre reinforced concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(1), 19–25.
- Mohod, M., & Kadam, K. (2016). Behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete pavement under static wheel load. *Sixth International Congress on Computational Mechanics and Simulation, August*.
- Naik, T. R., Malhotra, V. M., & Popovics, J. S. (2004). The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In *Handbook on nondestructive testing of concrete*.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (Fifth Edit).
- Nkem, A., Ige, A. (2014). Optimal polypropylene fiber content for improved compressive and flexural strength of concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11,3. PP 129-135.
- NSR-10, (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Asociación de ingeniería Sísmica.
- Paegle, L., Fischer, G., Jönsson, J. (2015). Characterization and modeling of fiber reinforced concrete for structural applications in beams and plates.[Tesis Doctoral, Technical University of Denmark]
- Pakravan, H. R., Jamshidi, M., & Latifi, M. (2016). The effect of hybridization and geometry of polypropylene fibers on engineered cementitious composites reinforced by polyvinyl alcohol fibers. *Journal of Composite Materials*, 50(8), 1007–1020.
- Pujadas, P., (2013). Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]
- Rai, A., & Joshi, Y. P. (2014). Applications and Properties of Fibre Reinforced Concrete. *Journal of Engineering Research and Applications*, 1, 123–131.

- Ramakrishnan, V., Speakman, J., Kakodkar, S., & Sure, V. R. (1994). Performance characteristics of monofilament polypropylene fiber-reinforced concrete. *Transportation Research Record, 1458*, 48–56.
- Ramírez, J. (2014). *Evaluación del Proceso de Daño y Deterioro Mecánico del Concreto Reforzado con Fibras Mediante Técnicas Acústicas*. Universidad Nacional de Colombia.
- RILEM TECHNICAL COMMITTEES. (2001). Rilem TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 34*(235), 3–6.
- Roman, J. L. (2015). *Análisis de las Propiedades del Concreto Reforzado con Fibras Cortas de Acero y Macrofibras de Polipropileno: Influencia del Tipo y Consumo de Fibra Adicionado*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rostami, R., Zarrebini, M., Mandegari, M., Sanginabadi, K., Mostofinejad, D., & Abtahi, S. M. (2019). The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties. *Cement and Concrete Composites, 97*, 118–124.
- Segre, N., Tonella, E., & Joekes, I. (1998). Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement based materials. *Cement and Concrete Research, 28*, 75–81.
- Selleck, S. F., Landis, E. N., Peterson, M. L., Shah, S. P., & Achenbach, J. D. (1998). Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage. *ACI Materials Journal, 95*(1), 27–36.
- Shin, E. H., Cho, K. S., Seo, M. H., & Kim, H. (2008). Determination of electrospun fiber diameter distributions using image analysis processing. *Macromolecular Research, 16*(No. 4), 314–319.
- Snyder, K. A., Feng, X., Keen, B. D., & Mason, T. O. (2003). Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH<sup>-</sup>, K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> concentrations. *Cement and Concrete Research, 33*(6), 793–798.
- Suksawang, N., Wtaife, S. & Alsabbagh, A. (2018). Evaluation of Elastic Modulus of Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, Title No. 115-M22.
- Sukontasukkul, P. (2004). Toughness Evaluation of Fibre Reinforced Concrete. *Thammasat Int. J. Sc. Tech., 9*(3).
- Vollpracht, A., Lothenbach, B., Snellings, R., & Haufe, J. (2015). The pore solution of blended cements: a review. *Materials and Structures, 49*(8).
- Wang, Y., Backer, S., & Li, V. C. (1987). An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. *Journal of Materials Science, 22*(12), 4281–4291.
- Wu, Y. A. O. (2002). Flexural Strength and Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced

- Concrete Beams. *Journal of Wuhan University of Technology*, 17(2), 54–57.
- Yadav, M., & Sharma, A. (2020). Comparative Analysis between Use of Polypropylene Fibers and Steel Fibers in Fiber Reinforced Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 07(08), 2106–2112.
- Yazici, Ş., Inan, G., & Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21, 1250–1253.