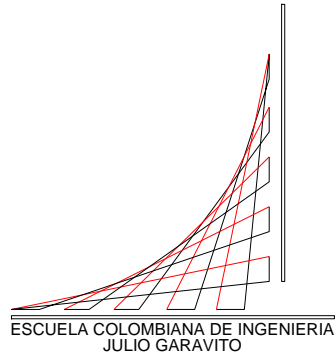


**DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA PARA CONCRETO  
REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE ACERO (SFRC)**

**Ing. SERGIO MAURICIO SEGURA ARENAS**



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
CENTRO DE ESTUDIOS DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES  
BOGOTÁ D.C.**

**2013**

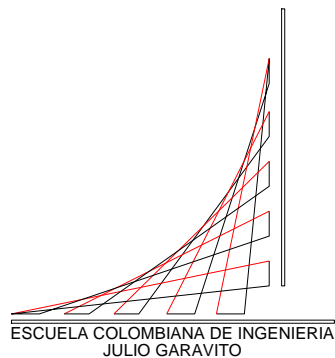
**DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA PARA CONCRETO  
REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE ACERO (SFRC)**

**Ing. SERGIO MAURICIO SEGURA ARENAS**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL**

**Director:**

**Msc. Ing. FABIÁN AUGUSTO LAMUS BAEZ**



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
CENTRO DE ESTUDIOS DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES  
BOGOTÁ D.C.  
2013**

**Nota de aceptación:**

El proyecto de grado denominado "DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE FRACTURA PARA CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE ACERO (SFRC)" presentado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras otorgado por la Escuela Colombiana de Ingeniería, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria

**Ing. Fabián Augusto Lamus Báez (Msc., C. PhD)**

**Bogotá D.C, 5 de Noviembre de 2013**

*Dedico el presente trabajo a Dios,  
a mi esposa Ludy, por su compañía y apoyo, a  
mi hijo Sebastián por su amor e inspiración.  
A mi abuela Guillermina quién falleció  
durante el transcurso de mis estudios.*

## **Agradecimientos**

Mi agradecimiento al cuerpo docente de la Maestría por su trabajo y apoyo, al personal de laboratorio, señores Ramón Torres y Cristian Cogollo por su colaboración y arduo trabajo durante toda la fase experimental.

A las compañías de ingeniería en las cuales trabajé durante el desarrollo de mis estudios y del presente trabajo de investigación, por su apoyo, comprensión y colaboración.

A compañeros y amigos adquiridos durante mi periodo de estudios en la Maestría, finalmente a la Escuela Colombiana de Ingeniería por brindar las facilidades a los profesionales para estudiar, aprender y participar en investigaciones que favorecen el desarrollo de la ingeniería nacional.

Al Director del Proyecto, ing. Fabián Lamus por su guía y apoyo, al Jurado evaluador ings. Nancy Torres y Pedro Nel Quiroga por su revisión y aporte.

Bogotá D.C., 5 de Noviembre de 2013

Señor:

**Ing. Germán Santos**

Director Programa Maestría en Ingeniería Civil

Escuela Colombiana de Ingeniería

Ciudad

Estimado Ingeniero:

Por medio del presente documento me permito presentar el informe final del Proyecto de Grado del aspirante al título de Magister en Ingeniería con énfasis en estructuras, Sergio Mauricio Segura Arenas identificado con la C.C. 79.781.414 de Bogotá, trabajo denominado: "Determinación de la Energía de Fractura en concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC)", dirigido por el Ingeniero Fabián Augusto Lamus Báez.

Atentamente,

**SERGIO MAURICIO SEGURA ARENAS**

C.C. No. 79' 781.414 de Bogotá D.C.

---

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>1 MECÁNICA DE FRACTURA</b>	<b>5</b>
1.1 GENERALIDADES	5
1.2 MECÁNICA DE FRACTURA DEL CONCRETO	5
1.2.1 Teoría Elástica Lineal	7
1.2.2 Teoría Elástica No Lineal	8
1.3 MODELOS DE FRACTURA PARA EL CONCRETO	9
1.3.1 Modelo de Fisura Cohesiva – MFC	10
1.3.2 Modelo de banda de fisuras – MBF	11
1.3.3 Modelo de fractura de dos parámetros – MFDP	13
1.3.4 Modelo del efecto de tamaño – MET	14
1.3.5 Modelo de fisura equivalente – MGE	16
1.3.6 Modelo de fractura doble K – MFDK	17
1.3.7 Modelo de fractura doble G – MFDG	18
<b>2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS</b>	<b>20</b>
2.1 GENERALIDADES	20
2.2 AGREGADO GRUESO	20
2.3 AGREGADO FINO	20
2.4 AGUA	21
2.5 CEMENTO	22
2.6 FIBRA METÁLICA	22
2.7 ADITIVO	23
<b>3 DISEÑO DE MEZCLAS</b>	<b>24</b>
3.1 MEZCLAS DE PRUEBA	24
3.2 CODIFICACIÓN DE MEZCLAS	26
3.3 MEZCLAS DEFINITIVAS	27

---

<b>4</b>	<b>COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN</b>	<b>30</b>
4.1	EFFECTO DE LAS FIBRAS A COMPRESIÓN	30
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
4.2.1	Fabricación de probetas	31
4.2.2	Ensayo de las muestras	33
4.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
4.3.1	Serie B	36
4.3.2	Serie A	38
4.3.3	Serie C	40
4.3.4	Análisis de promedios	41
4.4	ENERGÍA DE FRACTURA EN COMPRESIÓN	44
<b>5</b>	<b>COMPORTAMIENTO EN FLEXIÓN</b>	<b>50</b>
5.1	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO	50
5.2	ENERGÍA DE FRACTURA EN FLEXIÓN	53
5.3	AJUSTES AL TRABAJO DE FRACTURA	55
5.3.1	Ajuste por histéresis	55
5.3.2	Ajuste por disipación en la masa	56
5.3.3	Ajuste por disipación en los apoyos	57
5.3.4	Ajuste de Cola Lejana	59
5.4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
5.4.1	Serie B	67
5.4.2	Serie A	68
5.4.3	Serie C	69
5.5	ENERGÍA TOTAL DE FRACTURA EN FLEXIÓN	72
<b>6</b>	<b>COMPORTAMIENTO EN TENSIÓN</b>	<b>79</b>
6.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	81
6.1.1	Serie B	84
6.1.2	Serie A	85
6.1.3	Serie C	86
6.2	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA	87
6.2.1	Comparación entre las series	88
6.3	ENERGÍA DE FRACTURA MODO I	90
6.3.1	Comparación entre las series	96

---



---

<b>7</b>	<b>COMPORTAMIENTO EN CORTANTE</b>	<b>98</b>
7.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	99
7.1.1	Serie B	102
7.1.2	Serie A	103
7.1.3	Serie C	104
7.2	RESISTENCIA AL CORTE	105
7.3	TENACIDAD ABSOLUTA	108
7.4	ÍNDICES DE TENACIDAD	111
7.5	ENERGÍA DE FRACTURA MODO II	113
<b>8</b>	<b>COMPARACIÓN DE ENERGÍA DE FRACTURA ENTRE ENSAYOS</b>	<b>120</b>
8.1	COMPARACIÓN CON LAS RESISTENCIAS OBTENIDAS	123
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>127</b>
9.1	CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN COMPRESIÓN	128
9.2	CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN FLEXIÓN	128
9.3	CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN TRACCIÓN INDIRECTA	128
9.4	CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN CORTANTE	129
9.5	RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	129
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>131</b>
	<b>ANEXOS</b>	
	ANEXO A. FICHAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	137
	ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLAS	145
	ANEXO C. ANÁLISIS GRÁFICO	161
	ANEXO D. AJUSTE DE COLA LEJANA	180
	ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO	191

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Comportamiento a fractura de los materiales	6
Figura 2. Evolución de la zona de proceso de fractura FPZ para el concreto	7
Figura 3. Principio de energía superficial	7
Figura 4. Modos básicos de fractura	8
Figura 5. Función de ablandamiento de materiales cuasi-frágiles	10
Figura 6. Idealización del modelo de banda de fisuras	12
Figura 7. Relaciones esfuerzo deformación en el Modelo de banda de fisuras	13
Figura 8. Curva carga-apertura de fisura modelo de fractura dos parámetros	14
Figura 9. Determinación de longitud de fisura efectiva	16
Figura 10. Representación gráfica del inicio de fisuración	18
Figura 11. Presentación de la fibra metálica IMOCOM 80/60	22
Figura 12. Efecto de cosido en control de fisura	30
Figura 13. Esquema de la energía disipada a compresión	44
Figura 14. Montajes para la obtención del modulo de rotura	50
Figura 15. Trabajo de fractura en el modelo de fisura cohesiva	53
Figura 16. Arreglo general de un montaje a flexión con carga central	54
Figura 17. Esfuerzos principales en la probeta en la carga pico	56
Figura 18. Curva P- $\delta$ de un ensayo a flexión interrumpido en $\delta_B$	60
Figura 19. Modelo de Bloques Rígidos	61
Figura 20. Montaje del ensayo a flexión utilizado	63
Figura 21. Modificación del comportamiento a tensión por contenido de fibra	79
Figura 22. Comportamiento a tensión de las mezclas fibro reforzadas	80
Figura 23. Ensayos comunes para la determinación de la tensión del concreto	81
Figura 24. Ensayo de tracción indirecta	81
Figura 25. Área de ligamento para el ensayo de tracción indirecta	91
Figura 26. Diferentes probetas para caracterización a cortante del concreto	98
Figura 27. Esquema de montaje del ensayo a corte	99

---

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Relación agua cemento – resistencia a la compresión	26
Gráfica 2. Gradación de los agregados combinados	28
Gráfica 3. Comportamiento en compresión de las probetas Serie B	36
Gráfica 4. Comportamiento en compresión de las probetas Serie A	38
Gráfica 5. Comportamiento en compresión de las probetas Serie C	40
Gráfica 6. Comparación resistencia esperada y obtenida	42
Gráfica 7. Variación de la resistencia con la adición de fibra	43
Gráfica 8. Energía de fractura en compresión	48
Gráfica 9. Energía de fractura en compresión comparación entre series	49
Gráfica 10. Comparación del módulo de rotura entre series	52
Gráfica 11. Variación de la energía disipada por histéresis	55
Gráfica 12. Variación de la energía disipada en la masa de la probeta	57
Gráfica 13. Variación de la energía disipada en los apoyos	58
Gráfica 14. Comportamiento en flexión de las probetas Serie B	67
Gráfica 15. Comportamiento en flexión de las probetas Serie A	68
Gráfica 16. Comportamiento en flexión de las probetas Serie C	69
Gráfica 17. Energía de Fractura total Modo I en flexión comparación entre series	73
Gráfica 18. Energía de fractura en flexión hasta $P_{max}$ comparación entre series	75
Gráfica 19. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=2.5$ mm	76
Gráfica 20. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=5$ mm	77
Gráfica 21. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=10$ mm	78
Gráfica 22. Comportamiento en tracción indirecta Serie B	84
Gráfica 23. Comportamiento en tracción indirecta Serie A	85
Gráfica 24. Comportamiento en tracción indirecta Serie C	86
Gráfica 25. Comparación de la resistencia a la tracción indirecta de las muestras	89
Gráfica 26. Comportamiento en cortante de las probetas Serie B	102
Gráfica 27. Comportamiento en cortante de las probetas Serie A	103
Gráfica 28. Comportamiento en cortante de las probetas Serie C	104
Gráfica 29. Comparación de la resistencia a cortante de las muestras	107
Gráfica 30. Comparación de la tenacidad absoluta promedio entre mezclas	110
Gráfica 31. Índices de tenacidad cortante	113

---

Gráfica 32. Energía de fractura modo II hasta Pmax comparación entre series	115
Gráfica 33. Energía de fractura modo II hasta $\delta = 2.5\text{mm}$ comparación series	116
Gráfica 34. Energía de fractura modo II hasta $\delta = 5\text{mm}$ comparación series	117
Gráfica 35. Energía de fractura modo II hasta $\delta = 10\text{mm}$ comparación series	118
Gráfica 36. Comparación entre energía de fractura Modo I y Modo II	121
Gráfica 37. Comparación entre energía de fractura Modo I a flexión y tracción indirecta	122
Gráfica 38. Comparación entre resistencia a compresión y tracción	123
Gráfica 39. Comparación entre resistencia a la flexión y energía de fractura	124
Gráfica 40. Comparación entre resistencia a la tracción indirecta y energía de fractura	125
Gráfica 41. Comparación entre resistencia al cortante y energía de fractura	126
Gráfica 42. Suavizado de los deformímetros	163
Gráfica 43. Comparación entre curvas de máquina Universal y LVDTs	163
Gráfica 44. Compresión A00, A05 y A10	164
Gráfica 45. Compresión A20, B00 y B05	165
Gráfica 46. Compresión B10, B20 Y C00	166
Gráfica 47. Compresión C05, C10 Y C20	167
Gráfica 48. Flexión A00, A05 y A10	168
Gráfica 49. Flexión A20, B00 y B05	169
Gráfica 50. Flexión B10, B20 Y C00	170
Gráfica 51. Flexión C05, C10 Y C20	171
Gráfica 52. Tracción indirecta A00, A05 y A10	172
Gráfica 53. Tracción indirecta A20, B00 y B05	173
Gráfica 54. Tracción indirecta B10, B20 Y C00	174
Gráfica 55. Tracción indirecta C05, C10 Y C20	175
Gráfica 56. Cortante A00, A05 y A10	176
Gráfica 57. Cortante A20, B00 y B05	177
Gráfica 58. Cortante B10, B20 Y C00	178
Gráfica 59. Cortante C05, C10 Y C20	179
Gráfica 60. Ajuste de cola probeta A00-2 y A00-3	180
Gráfica 61. Ajuste de cola probeta A05-1, A05-2 y A05-3	181
Gráfica 62. Ajuste de cola probeta A10-1, A-10-2 y A20-1	182
Gráfica 63. Ajuste de cola probeta A20-2, A20-3 y B00-1	183
Gráfica 64. Ajuste de cola probeta B00-2, B05-1 y B05-2	184

---

Gráfica 65. Ajuste de cola probeta B05-3, B10-1 y B10-2	185
Gráfica 66. Ajuste de cola probeta B10-3, B20-1 y B20-2	186
Gráfica 67. Ajuste de cola probeta B20-3, C05-1 y C05-2	187
Gráfica 68. Ajuste de cola probeta C05-3, C10-1 y C10-2	188
Gráfica 69. Ajuste de cola probeta C10-3, C20-1 y C20-2	189
Gráfica 70. Ajuste de cola probeta C20-3	190

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Principales modelos de fractura no lineal elástica	9
Tabla 2. Caracterización agregado grueso	20
Tabla 3. Caracterización agregado fino	20
Tabla 4. Pesos retenidos del agregado fino y cálculo del módulo de finura	21
Tabla 5. Características físicas y mecánicas de la fibra metálica	23
Tabla 6. Dosificación mezclas de prueba	25
Tabla 7. Resistencia a la compresión en las mezclas de prueba	25
Tabla 8. Resumen de las probetas fabricadas	28
Tabla 9. Consumo de materiales en las mezclas	29
Tabla 10. Fechas de fabricación y rotura de las probetas cilíndricas	33
Tabla 11. Resistencia a la compresión probetas serie B	37
Tabla 12. Resistencia a la compresión probetas serie A	39
Tabla 13. Resistencia a la compresión probetas serie C	41
Tabla 14. Resistencia a la compresión promedio de las series	42
Tabla 15. Energía de fractura en compresión	46
Tabla 16. Evaluación de resistencia y energía de fractura en compresión	49
Tabla 17. Cálculo de la resistencia a flexión	51
Tabla 18. Probetas ensayadas a flexión	65
Tabla 19. Duración de los ensayos a flexión	66
Tabla 20. Cálculo de la energía de fractura Modo I para flexión	70
Tabla 21. Energía de fractura en flexión hasta $P_{max}$	75
Tabla 22. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=2.5$ mm	76
Tabla 23. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=5$ mm	77
Tabla 24. Energía de fractura en flexión hasta $\delta=10$ mm	78
Tabla 25. Probetas ensayadas a tracción indirecta	82
Tabla 26. Resistencia a la tracción indirecta	87
Tabla 27. Variación de la resistencia a tracción indirecta	90
Tabla 28. Energía de fractura hasta $P_{max}$	92
Tabla 29. Energía de fractura hasta $\delta =2.5$ mm	93
Tabla 30. Energía de fractura hasta $\delta =5$ mm	94
Tabla 31. Energía de fractura hasta $\delta =10$ mm	95

Tabla 32. Incremento de GF a tensión indirecta con la adición de fibras	97
Tabla 33. Edad y duración de ensayos de las probetas a corte	101
Tabla 34. Esfuerzo máximo de corte	106
Tabla 35. Incrementos de resistencia al corte en concreto SFRC	108
Tabla 36. Cálculo de la tenacidad Absoluta	110
Tabla 37. Cálculo de los índices de tenacidad	111
Tabla 38. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta Pmax	115
Tabla 39. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta $\delta = 2.5\text{mm}$	116
Tabla 40. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta $\delta = 5\text{ mm}$	117
Tabla 41. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta $\delta = 10\text{mm}$	118
Tabla 42. Evaluación de la energía de fractura modo II – Promedios	119
Tabla 43. Comparación entre los modos de fractura I y II	120
Tabla 44. Comparación entre los modos de fractura I - flexión y tracción indirecta	121

---

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Construcción probetas cilíndricas	32
Fotografía 2. Testigos de concreto simple con retiro manual de fibra	33
Fotografía 3. Montaje del ensayo a compresión concreto SFRC	35
Fotografía 4. Realización de fisura inducida	63
Fotografía 5. Ensayo de flexión en viguetas	64
Fotografía 6. Estado del espécimen al final del ensayo	65
Fotografía 7. Montaje e instrumentación del ensayo	83
Fotografía 8. Ensayo de corte probeta M.B05-6	100
Fotografía 9. Ensayo de corte probeta M.B00-4	100
Fotografía 10. Localización de los deformímetros en los ensayos	162
Fotografía 11. Aspecto de la mezcla con $\rho_f = 2,0\%$	191
Fotografía 12. Asentamiento nulo de mezcla con fibra $\rho_f = 2,0\%$	191
Fotografía 13. Falla diagonal en un cilindro a compresión	192
Fotografía 14. Aspecto de los cilindros fallados	192
Fotografía 15. Falla de cilindro con $\rho_f = 2,0\%$ antes de estallar	193
Fotografía 16. Ensayo de flexión estado inicial	193
Fotografía 17. Inicio de fisuración	194
Fotografía 18. Colapso de la probeta sin fibra	194
Fotografía 19. Estado de equilibrio de una viga fallada a flexión con $\rho_f = 2,0\%$	195
Fotografía 20. Aspecto de una viga con $\rho_f = 2,0\%$ fallada a flexión	195
Fotografía 21. Aspecto de una vigueta al final del ensayo de flexión $\rho_f = 0,5\%$	196
Fotografía 22. viguetas fracturadas a flexión	196
Fotografía 23. Aspecto del inicio del ensayo de tracción indirecto	197
Fotografía 24. Aspecto de la probeta al final del ensayo de tracción indirecta	197
Fotografía 25. Colapso de probeta de concreto simple a tracción indirecta	198
Fotografía 26. Aspecto final de una probeta con $\rho_f = 1,0\%$ fallada a tracción	198
Fotografía 27. Colapso de una vigueta a corte sin fibra	199
Fotografía 28. Colapso de una vigueta con $\rho_f = 0,5\%$	199
Fotografía 29. Daño en los apoyos en una vigueta a cortante	200
Fotografía 30. Daño en los apoyos por aplastamiento $\rho_f = 0,5\%$	200



---

## NOMENCLATURA

$a_0$	Longitud de la fisura inicial, longitud de la muesca o ranura
A	Factor de ajuste de cola lejana
Alig	Área de liga de las dos caras de la fisura, sección efectiva de vigueta
B	Ancho de la viga
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement, Desplazamiento de apertura en la fisura
$\delta$	Deflexión o flecha
$\phi$	Diámetro del espécimen
D	Altura o canto de la vigueta
De	Altura efectiva de la vigueta
$f_c$	Resistencia a la compresión del concreto a una edad de 28 días [MPa]
$f_{ts}$	Resistencia a la tensión del concreto [MPa]
$f_R$	Módulo de rotura, resistencia a la flexión del concreto [MPa]
g	Aceleración de la gravedad
$G_f$	Tasa de energía de deformación crítica para especímenes infinitamente grandes basada en el modelo efecto de tamaño
$G_F$	Energía específica de fractura expresada en [J/m <sup>2</sup> ] o [N/mm]
$GF^c$	Energía específica de fractura en compresión
$GF_I$	Energía específica de fractura para fisura modo I
$GF_{II}$	Energía específica de fractura para fisura modo II
$GF_{III}$	Energía específica de fractura para fisura modo III
MFC	Modelo de fisura cohesiva
S	Luz libre entre los apoyos
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete, Concreto reforzado con fibras cortas de acero
$P_u$	Carga máxima alcanzada
$\tau$	Resistencia al cortante del concreto [MPa]
w	Apertura en la boca de la fisura
w <sub>c</sub>	Apertura crítica en la boca de la fisura
WF	Trabajo total de fractura
WF <sub>0</sub>	Trabajo inicial de fractura medido como el área bajo la curva P- $\delta$

## INTRODUCCIÓN

La adición de fibras cortas de acero al concreto es una técnica que se viene desarrollando desde hace varias décadas y que dio origen al concreto reforzado con fibras cortas de acero SFRC, la presencia de fibras de acero en la matriz de concreto afecta las propiedades de la mezcla fresca, por lo cual se requieren requisitos específicos para su preparación (ACI, 2008), las mezclas adicionadas con fibras de acero conllevan una mejora en su desempeño, observada la mejora como disminución de la fisuración por retracción, aumento en la resistencia a tensión y aumento en la ductilidad de la mezcla. El aumento en la energía específica de fractura  $G_F$ , en concretos reforzados con fibra, es mucho más considerable que el aumento del resto de las propiedades mecánicas observadas (CHUANBO, 2006), dicho parámetro obtenido a partir de la mecánica de fractura no lineal representa adecuadamente la incursión inelástica del concreto ya que a través de la disipación de energía durante la formación, y crecimiento del proceso de fracturación se cuantifica adecuadamente la mejora en desempeño del concreto.

La mecánica de fractura es una disciplina estructural aplicada en sus inicios a los materiales frágiles y dúctiles y posteriormente adaptada a los cuasi-frágiles como el concreto y la cerámica. La mecánica de fractura del concreto cobra mayor relevancia para el diseño estructural debido a que captura adecuadamente el “efecto tamaño” de los elementos estructurales, a través de su comportamiento en fractura. (BAŽANT y PLANAS, 1998)

La fibra empleada en el presente trabajo de investigación corresponde a una fibra metálica de alta resistencia y alto modulo, provista con ganchos de anclaje cuya función es “coser” las caras de las fisuras en formación aumentando la resistencia a la tensión, de manera que durante la falla se desarrolle fluencia y rotura de las fibras, al generar resistencia a la apertura y crecimiento de las fisuras produce una mejora generalizada en el desempeño de la matriz de concreto.

El trabajo de investigación procuró la obtención experimental de la energía específica de fractura  $G_F$ , entendido como propiedad intrínseca del material, obtenida para diferentes modos de fractura, a través del modelo de fisura cohesiva, MFC.

Finalmente se presentaron las comparaciones de energía de fractura entre series de especímenes variando simultáneamente la relación agua/cemento y la adición de fibra para determinar las tendencias y acotar la dispersión en los valores

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Determinar la Energía de Fractura para probetas representativas construidas con concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC) sometidas a flexión, corte, compresión y tensión elaboradas con materiales disponibles en el país.

### Objetivos específicos

1. Determinar los valores de energía de fractura para cuatro (4) cuantías diferentes de fibras cortas de acero en mezclas de concreto simple con tres (3) diferentes valores de resistencia normal a la compresión  $f'_c$ .
2. Comparar la variación de energía de fractura entre cilindros con adición de fibras cortas de acero y muestras de concreto simple solicitadas a compresión.
3. Comparar la variación de energía de fractura del concreto entre vigas con adición de fibras cortas de acero y vigas de concreto simple solicitadas a flexión.
4. Comparar la variación de comportamiento entre cilindros con adición de fibras cortas de acero y muestras de concreto simple solicitadas a tensión indirecta.
5. Comparar la variación de energía de fractura entre probetas prismáticas con adición de fibras cortas de acero y muestras de concreto simple solicitadas a cortante inducido.

## ANTECEDENTES

La caracterización del concreto con adición de fibra metálica se ha realizado históricamente mediante la medición de la ganancia en tenacidad de las muestras elaboradas con la mezcla, dado que la mejora en desempeño hasta el límite elástico o hasta el esfuerzo máximo es mucho menos sobresaliente respecto a la mejora en desempeño que se produce después que el concreto inicia la fisuración, la cual se produce antes del esfuerzo máximo y es el punto a partir del cual empieza a trabajar la fibra metálica. De acuerdo con dicha condición es más apropiado cuantificar la ganancia en comportamiento a través de los principios de la Mecánica de la Fractura, disciplina estructural que evolucionó a partir de la resistencia de materiales con amplia difusión en la metalurgia y que se adaptó al concreto a través de la mecánica de fractura no lineal, la cual se enfoca en los materiales cuasifrágiles, como el concreto y la cerámica.

Uno de los parámetros de la Mecánica de Fractura del concreto para medir el desempeño posterior a la fisuración es la Energía específica de Fractura  $G_F$ , entendida como la tasa de energía liberada para generar una superficie de fractura, dicho concepto se explica en detalle en el Capítulo 1.

Los valores de Energía específica de Fractura, se pueden considerar una propiedad del material cuando se obtienen de acuerdo a las recomendaciones de los ensayos, cuando se aíslan fuentes de disipación y si se tiene en cuenta el llamado “efecto tamaño” el cual se explica en el numeral 1.3.4. Adicionalmente la Energía de Fractura se ve influenciada por la calidad de la mezcla de concreto, la cual a su vez depende de las propiedades de los materiales locales. Por todo lo anterior es relevante la obtención del parámetro  $G_F$  para los concretos simples y adicionados con fibra corta de acero en Colombia. El parámetro  $G_F$  es ampliamente utilizado en los modelos de daño del concreto para simulaciones numéricas.

A nivel nacional no se han documentado ensayos de energía de fractura para SFRC, pero si se han realizado investigaciones para cuantificar el comportamiento del concreto con adición de fibra metálica y sintética. (AVELLA y MENDOZA, 2004) realizaron la caracterización de concreto para pisos industriales con módulo de rotura de 4.1 MPa, utilizando fibra metálica y fibra sintética, la fibra metálica empleada es de baja relación de aspecto ( $l/d = 50$ ) lo cual implica baja disipación de energía. Se realizaron ensayos para caracterización mecánica de comportamiento, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y resistencia a la flexión, y ensayos sobre placas para medir la capacidad de disipación de energía. La capacidad de energía obtenida no es equivalente la Energía de Fractura del concreto, principalmente por que el patrón de fractura es aleatorio.

(NAVARRETE y SALAZAR, 2009) evaluaron las mejoras en desempeño para CRFA y para concreto con adición de fibras sintéticas a través de la medición del módulo de tenacidad, entendido como el área bajo la curva esfuerzo-deformación, ese parámetro así obtenido constituye una medida de la capacidad de disipación de energía, pero no es

equivalente a la energía específica de fractura la cual se obtiene de manera normalizada considerando el área de fisuración y el modo de fractura como se explica en el numeral 1.2.1. Igualmente se midieron resistencias máximas a compresión y flexión.

La presente investigación busca establecer y comparar valores de  $G_F$  bajo diferentes modos de fractura para diferentes concretos simples y adicionados con un tipo de fibra metálica de alta capacidad de disipación, relación de aspecto ( $l/d=80$ )

## 1 MECÁNICA DE FRACTURA

### 1.1 GENERALIDADES

Con frecuencia la falla de un elemento estructural se inicia por un tipo de discontinuidad denominado grieta o fisura (HILLERBORG, 1978), dicha discontinuidad crece y se propaga a través del material hasta ocasionar la falla por colapso, o cuando menos la pérdida de servicio de la estructura. La mecánica de la fractura estudia la formación y propagación de la fisuración y su relación con el material de la estructura.

Mientras que la mecánica de la fractura fue ampliamente aceptada en el análisis de falla del metal en la industria aeronáutica, aeroespacial, naval y nuclear, su desarrollo y adopción en las estructuras de concreto tardó en implementarse, más allá del campo de la investigación. Aún en la actualidad permanece al margen de muchos códigos de diseño pero paulatinamente ingresa a las filosofías de diseño en la medida que el “efecto de tamaño estructural” toma mayor importancia conforme se presentan retos a la ingeniería en el diseño de grandes estructuras.

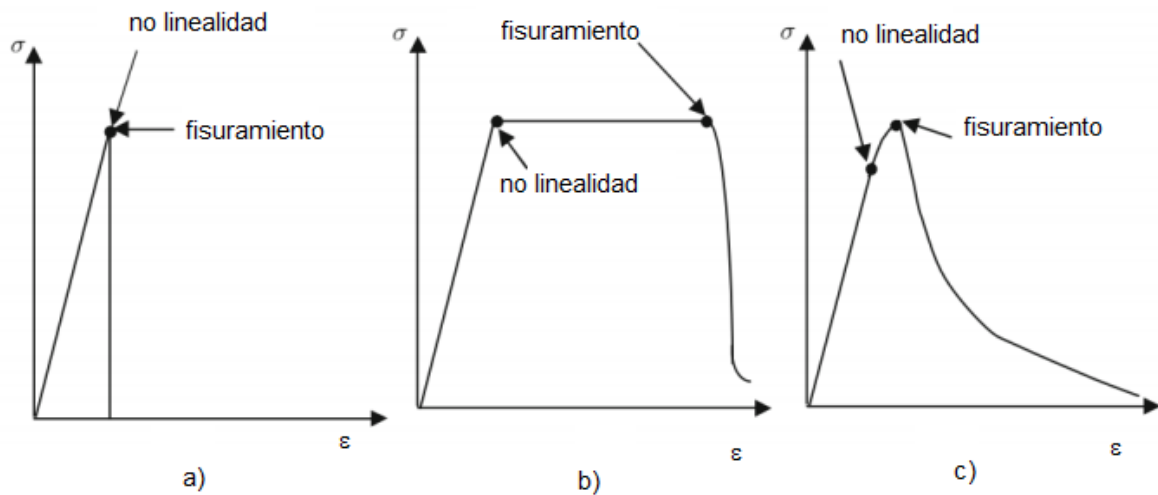
El estado de arte de la mecánica de fractura para el concreto fue compilado a partir de los textos (SHAH et al., 1995), (BAŽANT y PLANAS, 1998) y (KUMAR y BARAI, 2011) citados en la bibliografía. Siendo este último el que recopila los modelos propuestos más recientes.

### 1.2 MECÁNICA DE FRACTURA DEL CONCRETO

Dentro de la mecánica de la fractura existen tres tipos de materiales idealizados: los frágiles, los dúctiles y los cuasifrágiles, cuyo comportamiento se ilustra por sus curvas esfuerzo – deformación, Figura 1. El concreto, junto con algunas rocas y materiales cerámicos exhibe un comportamiento cuasifrágil, es decir intermedio, entre frágil y dúctil con un comportamiento ablandado posterior a la carga post- pico.

Por otro lado, las estructuras de concreto son proclives usualmente a la fisuración. Las fallas pueden involucrar zonas estables de formación y crecimiento de fisuras mucho antes que la carga de rotura sea alcanzada (BAŽANT y PLANAS, 1998)

Una explicación por la cual no se desarrolló al mismo ritmo la mecánica de la fractura en el concreto que en otros materiales como el vidrio, o el acero, fue la divergencia en resultados que se presentaron en la teoría lineal clásica, pudiendo afirmarse que a pesar de que la teoría estuvo disponible a partir de la década de 1950, su impulso en el concreto sobrevino con las investigaciones de 1970 y 1980.

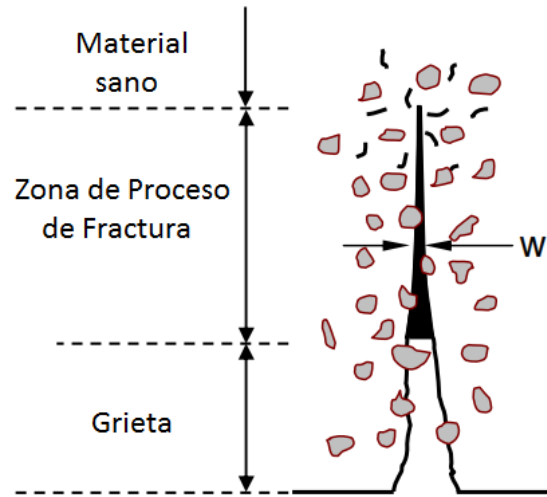


**Figura 1. Comportamiento a fractura de los materiales**

a) Frágil, b) dúctil y c) cuasifrágil. Adaptada de (BAŽANT y PLANAS, 1998)

En particular el comportamiento a fractura del concreto se ve gobernado por el crecimiento, extensión y propagación de la fisura a través de la denominada zona de proceso de fractura, o FPZ, a su vez el crecimiento de la fisura a través de la FPZ se ve influenciado por la resistencia del concreto, el tamaño y forma de los agregados, la presencia de adiciones, la velocidad de sollicitación y el calor de hidratación, entre otras variables. (KUMAR y BARAI, 2011)

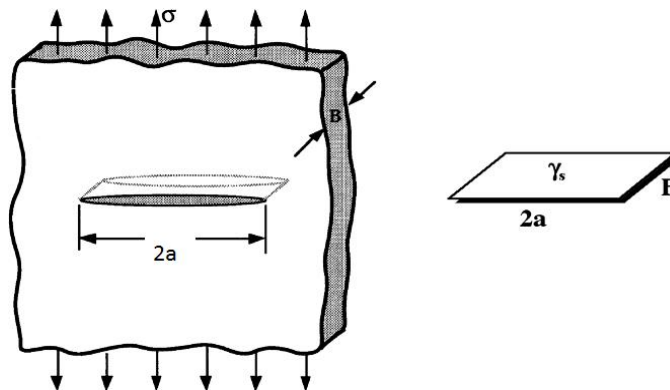
Los materiales cuasifrágiles como el concreto y el mortero no agotan su capacidad de carga una vez han alcanzado una tensión igual a su resistencia última. En la Figura 2 se diferencian de izquierda a derecha 3 zonas, la zona de fisura abierta, que no tiene posibilidad de transmitir tensiones entre los labios de la fisura, la zona en proceso de fractura, en la cual el material ha superado su resistencia y se ha roto pero continua transmitiendo tensiones normales y tangenciales a través de los labios de la fisura y la zona de material sano en el cual no se ha alcanzado la resistencia. En la zona de material sano, por la misma naturaleza del concreto, existe una microfisuración a nivel microscópico. La zona de proceso de fractura o FPZ, es lo que distingue a un material cuasifrágil de los demás.



**Figura 2. Evolución de la zona de proceso de fractura FPZ para el concreto**

Adaptada de (BUI, 2007)

**1.2.1 Teoría Elástica Lineal.** En los inicios de la mecánica de fractura se desarrolló la denominada solución elástica de esfuerzos para la fisura, la cual se idealizó mediante la representación de una elipse dentro de un sólido infinito, ver Figura 3 . (GRIFFITH, 1924) determinó que una expresión en términos de esfuerzos no era adecuada dado que estos tienden a infinito en la punta o vértice de la elipse, con ello surgió el criterio de energía como base para los análisis de la mecánica de fractura elástica y lineal, MFLE.



**Figura 3. Principio de energía superficial**

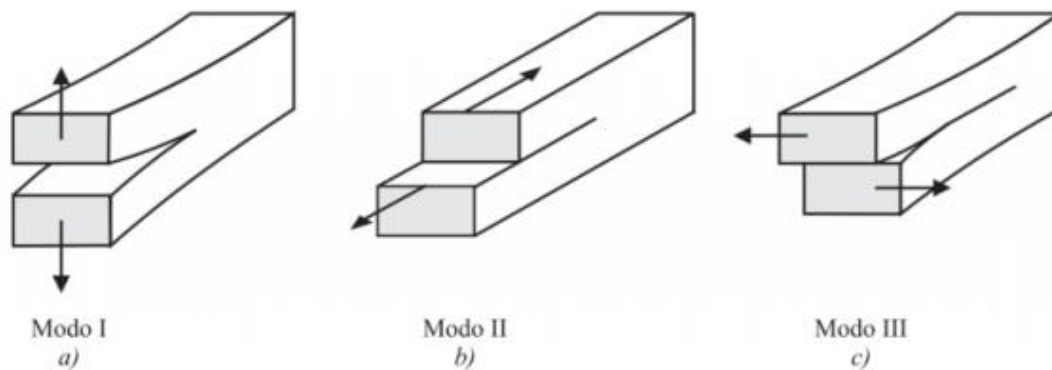
Tomada de (ARANA y GONZÁLEZ, 2002)

El principio de (GRIFFITH, 1924) incluye por primera vez el concepto de energía liberada en el proceso de fractura, al enunciar, basado en la primera ley de la termodinámica que *“se puede formar una fisura (o una fisura existente crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante”*.



Los modos de fractura que puede sufrir el cuerpo fisurado se muestran en la Figura 4 y corresponden a:

- a) Modo I apertura, corresponde a la separación de las caras de la fisura por cuenta de la aplicación de tensiones normales al plano de la fisura.
- b) Modo II deslizamiento, se refiere al desplazamiento de los labios por la acción de fuerzas de corte de signo contrario y paralelas al frente de fisura.
- c) Modo III desgarre, se refiere al desplazamiento y cizallamiento de los labios de la fisura por la acción de fuerzas de tensión perpendiculares al frente de fisura.



**Figura 4. Modos básicos de fractura**

Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

El criterio de energía expresado como un balance indica que la fisura crece si la energía suministrada por unidad de área de material es igual a la energía requerida para que ello ocurra. (BAŽANT y PLANAS, 1998)

Pronto aparecieron las limitaciones a la MFLE en especial para los materiales cuasifrágiles, como el concreto en este caso, dado que la solución es válida cuando la fisura es pequeña en comparación con el tamaño del cuerpo sólido. Sus principios continúan siendo válidos y se aplican con éxito siempre y cuando se tenga en cuenta su rango de aplicación.

**1.2.2 Teoría Elástica No Lineal.** Tan pronto surgieron las limitaciones en la teoría de la MFLE, para representar adecuadamente el comportamiento en la fractura del concreto se hizo evidente la necesidad de desarrollar modelos adicionales. Diferentes investigadores iniciaron la caracterización del concreto, cuya ley constitutiva de ablandamiento fue desconocida hasta mediados de los 70.

Los modelos de fractura en mecánica de fractura no lineal elástica, MFNLE en el presente trabajo partieron a partir de los principios de la teoría lineal.

Se debe mencionar como referencia obligada el trabajo pionero de (HILLERBORG, 1978), el cual propuso el primer modelo de fisura cohesiva en un estudio de propagación de fisuras en una viga de concreto simple.

Desde entonces y hasta la fecha se han propuesto modelos adicionales, con algunas variantes incluidas, para intentar idealizar el comportamiento a la fractura de los materiales cuasifrágiles, y en especial para el concreto.

### 1.3 MODELOS DE FRACTURA PARA EL CONCRETO

Los modelos de la MFNLE están basados en dos aproximaciones o corrientes:

- Usando métodos de elementos finitos con elementos de frontera, y
- Usando conceptos modificados de la mecánica de fractura lineal y elástica.

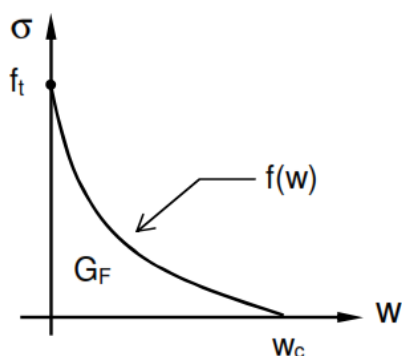
En la Tabla 1 se visualizarán los principales modelos de la MFNLE, con la traducción que propone el autor y una reseña acerca de los investigadores involucrados en su desarrollo y la fecha de su publicación:

**Tabla 1. Principales modelos de fractura no lineal elástica**

CCM Cohesive crack model	MFC Modelo de fisura cohesiva	(DUGDALE, 1960) (BARENBLATT, 1962) (HILLERBORG, 1978)
CBM Crack band model	MBF Modelo de banda de fisuras	(BAŽANT y OH, 1983)
TPFM Two parameters fracture model	MFDP Modelo de fractura de dos parámetros	(JENQ y SHAH, 1985)
SEM Size effect Model	MET Modelo del efecto de tamaño	(BAŽANT, 1984)
ECM Effective Crack model	MGE Modelo de fisura equivalente	(NALLATHAMBI y KARIHALOO, 1986)
DKFM Double K fracture model	MFDK Modelo de fractura doble K	(XU y REINHARDT, 1999)
DGFM Double G fracture model	MFDG Modelo de fractura doble G	(XU y ZHANG, 2008)

Se procede seguidamente a explicar muy brevemente en qué consiste cada uno de los modelos, para posteriormente realizar la selección de los modelos aplicables al cumplimiento del objetivo del presente trabajo.

**1.3.1 Modelo de Fisura Cohesiva – MFC.** La formulación del modelo se atribuye a (BARENBLATT, 1962) quién lo propuso para simular el comportamiento de fractura de materiales frágiles, (DUGDALE, 1960) introdujo la variante para definir el comportamiento de materiales dúctiles y cuasi-frágiles con la denominada función de ablandamiento  $f(w)$ , véase la Figura 5. Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de tensión y  $w$  la apertura de la fisura.



**Figura 5. Función de ablandamiento de materiales cuasi-frágiles**  
Tomada de (BAŽANT y PLANAS, 1998)

La esencia básica del modelo es la descripción del comportamiento no lineal en la proximidad de la fisura y en el frente de avance de la fisura. Como principio fundamental se asume que la fisura se extiende y abre mientras continua transfiriendo esfuerzos entre las caras de la fisura.

Tres propiedades del material son requeridas para describir el modelo:

- $f_t$  : Resistencia a la tensión directa del concreto
- $E$  : Módulo de elasticidad
- $G_F$  : Energía específica de fractura

$G_F$  es, por definición, la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de superficie completamente fisurada y es el área bajo la curva de la función de ablandamiento, ver Figura 5, donde  $w$  es la apertura de fisura,  $w_c$  la apertura de fisura crítica donde se pierde completamente la capacidad de resistir tensión y  $\sigma$  el esfuerzo de tensión del material.

La no linealidad en el modelo de fisura cohesiva, representada por medio de relaciones esfuerzo – apertura de fisura, se denomina función de ablandamiento, a través de las caras de la fisura y cercanas al frente de fisura.

La manera directa para determinar la curva de ablandamiento del concreto es mediante un ensayo de tensión directa uniaxial, por alguno de los ensayos propuestos (AKAZAWA,

1953) y (RILEM, 2001), este último específico para concreto fibro-reforzado, sin embargo dificultades para la realización del ensayo en condiciones estables han llevado a la práctica generalizada de ensayos de flexión y de tracción indirecta, los cuales se discutirán más adelante.

Algunas de las dificultades con los ensayos de tensión uniaxial directa son: aparición de varias fisuras simultáneamente, disipación por flexiones laterales y traslape de fisuras. Ver en la Figura 5 la curva o función de ablandamiento

En el modelo de fisura cohesiva la energía de fractura viene dada por:

$$GF = \int_0^{w_c} f(w)dw \quad \text{Ec. 1.1}$$

Como se mencionó, la dificultad para determinar directamente la curva de ablandamiento llevó al desarrollo de los ensayos de flexión con carga central para determinar la energía de fractura mediante la determinación del trabajo de fractura propuesto inicialmente por (HILLERBORG, 1978) y cuyo procedimiento experimental se adoptó por el comité Europeo RILEM bajo la denominación RILEM TC89-FMC (RILEM, 1985) para determinar la energía de fractura mediante ensayos de flexión sobre vigas de concreto o mortero con ranura.

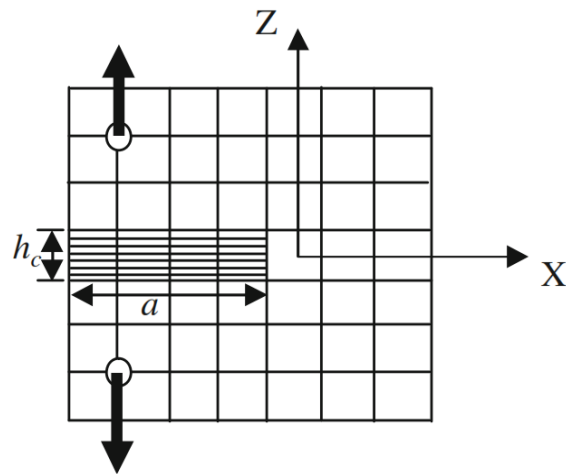
El modelo de fisura cohesiva es el de más amplia aplicación documentada y es el utilizado para la determinación de la energía de fractura en el presente trabajo. La descripción y ajustes requeridos por el método se describen en profundidad en el 5.2.

**1.3.2 Modelo de banda de fisuras – MBF.** El modelo de bandas de fisuras se consideró el primer acercamiento al modelamiento de fractura mediante simulación numérica y posteriormente elementos finitos, hoy en día las limitaciones y condiciones de frontera no son necesarias, debido al desarrollo de los computadores y de los programas o códigos de elementos finitos utilizados. Se presenta una breve descripción del modelo.

Adaptando el modelo de (HILLERBORG, 1978), (BAŽANT y OH, 1983) desarrollaron un modelo de bandas en el cual la zona de proceso de fractura es modelada como un sistema de fisuras paralelas que son continuamente dispersadas (ablandadas) en el elemento finito. Ver Figura 6, el eje “Y” es perpendicular al plano.

El ancho de la zona de fractura se asume constante ( $h_c$ ), para concreto normal se asume que es aproximadamente 3 veces el tamaño máximo del agregado. El ancho de la banda de fisuras se mantiene constante a fin de evitar sensibilidad por tamaño de malla. Esto asegura que la disipación de energía debida a fractura por unidad de área es una constante y que es equivalente a la energía de fractura del material,  $G_F$ .

La fisura es modelada mediante el artificio de cambiar el módulo elástico isotrópico en la matriz concreto agregados, por uno ortotrópico, de esa manera se reduce la rigidez en la dirección normal al plano de la fisura.



**Figura 6. Idealización del modelo de banda de fisuras**

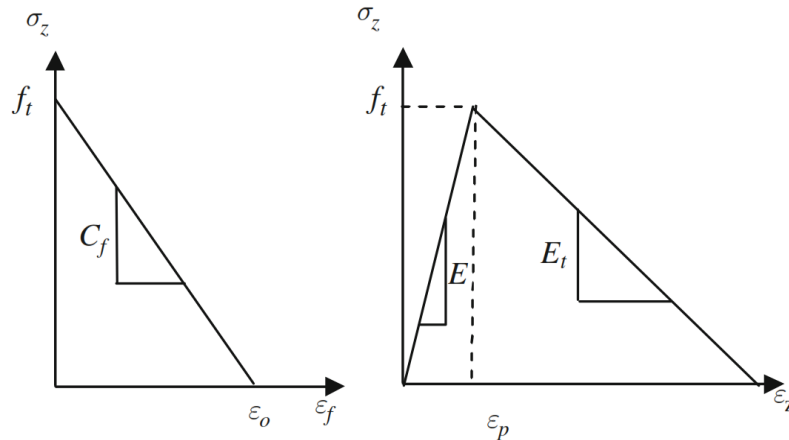
Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

El ablandamiento en la respuesta estructural del concreto se simula mediante la sobreposición de una deformación de fractura  $\varepsilon_f$  con las deformaciones calculadas a partir de los esfuerzos cohesivos así:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varepsilon_f \end{Bmatrix}$$

Donde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  corresponden a los esfuerzos cohesivos,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  corresponde a las deformaciones unitarias,  $\varepsilon_f$  es la deformación de fractura por apertura de fisuras,  $E$  el módulo de elasticidad del concreto y  $\nu$  la relación de Poisson.

La fractura inicia cuando el esfuerzo en la punta de la fisura alcanza la resistencia a la tensión, en ese punto  $\varepsilon_f$  es todavía cero. Cuando la fisura se abre  $\delta_f$  se incrementa mientras  $\sigma_x$  decrece, el modelo más simple adoptado es el de una función lineal.



**Figura 7. Relaciones esfuerzo deformación en el Modelo de banda de fisuras**

Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

La energía de fractura  $G_F$  definida como la energía consumida en abrir la fisura de una banda viene dada por:

$$G_F = h_c \int_0^{\varepsilon_0} \sigma_z(\varepsilon) d\varepsilon \quad \text{Ec. 1.2}$$

La integral representa el área bajo la curva esfuerzo – deformación, si una relación entre éstas es asumida como lineal, tenemos entonces:

$$G_F = \frac{f t^2}{2 C_f} h_c \quad \text{Ec. 1.3}$$

Sin embargo  $G_F$  y  $f_t$  deben ser encontrados experimentalmente y se constituyen en los datos de entrada a los modelos de bandas. El MBG posee algunas limitaciones como son:

- El refinamiento del mallado no puede ser más pequeño que el ancho de la zona de fisuras.
- La propagación en zig-zag necesita tratamiento matemático especial.
- El mallado rectangular introduce un cierto grado de desviación direccional o de trabajo en un sentido.
- Posibles variaciones del ancho de la zona fracturada y por lo tanto en los valores de energía pasan desapercibidos.

La propuesta es ampliamente aplicada en los modelos por elementos finitos.

El modelo de banda de fisuras no hace parte del alcance del presente trabajo.

**1.3.3 Modelo de fractura de dos parámetros – MFDP.** Modelo propuesto por (JENQ y SHAH, 1985), donde la fisura es remplazada por una fisura ficticia equivalente. El proceso de fractura es caracterizado por dos parámetros:

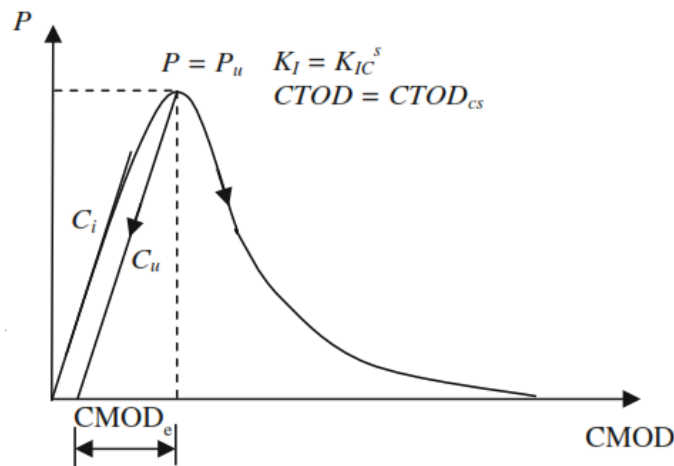
$K_{IC}^s$	Factor de intensidad de esfuerzo crítico en el frente de fisura equivalente a la carga pico
$CTOD_c$	Apertura crítica en la punta de la fisura

Para la obtención experimental de los parámetros se requieren ciclos de carga y descarga, la propuesta fue realizada en un ensayo de viga en 3 apoyos, pero posteriormente se ha utilizado en otros montajes.

El valor de  $K_{IC}^s$  obtenido en este modelo ha probado ser independiente de la geometría de las probetas, sin embargo investigaciones posteriores demostraron fuerte dependencia del efecto de tamaño.

De otra parte la porción inelástica del total del CMOD es ignorada, lo cual posiblemente ocasiona una sobrestimación del valor de  $a_c$  (longitud crítica de fisura)

Como desventaja principal está el hecho de requerir un ensayo de ciclo cerrado (control automático de carga y desplazamiento continuo) para determinar mediante carga y descarga los parámetros de fractura.



**Figura 8. Curva carga-apertura de fisura modelo de fractura dos parámetros**

Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

El modelo de fractura de dos parámetros no conlleva la medición directa de energía de fractura, por lo cual no fue tenido en cuenta para el presente trabajo.

**1.3.4 Modelo del efecto de tamaño – MET.** Todos los modelos de fractura no lineal capturan directa o indirectamente el efecto tamaño del elemento estructural (KUMAR y BARAI, 2011). El efecto tamaño es un fenómeno que sucede en materiales cuasifrágiles, como el concreto, y consiste en que en estructuras geoméricamente similares pero de

distinto tamaño se presentan diferentes tensiones nominales en el instante de falla (BAŽANT y PLANAS, 1998). El efecto tamaño en estructuras de concreto ha sido uno de los principales objetivos de diversos investigadores que tienen como objetivo determinar leyes de efecto tamaño que permitan comparar, por ejemplo, factores de seguridad, resistencia, propagación de la fractura, etc., en elementos estructurales geoméricamente similares de diferente tamaño.

El efecto tamaño en estructuras de concreto se explica a través de la teoría estadística, la determinista y la de fractales (RILEM, 2004). De éstas, la teoría más universal y utilizada es la determinista del profesor Bazant (BAŽANT y PLANAS, 1998)

La ley de efecto tamaño determinista de Bazant establece una relación entre la tensión nominal en el momento de la falla  $\sigma_N$ , y la geometría de los especímenes ensayados para cada tipo de concreto. La ley efecto tamaño de Bazant para vigas entalladas\* sometidas a ensayos de flexión en tres puntos viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_N = \frac{Pu}{BD} = \sqrt{\frac{EG_f}{g'(\alpha)C_f + g(\alpha)D}} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde  $Pu$  es la carga máxima,  $B$  el espesor del espécimen,  $D$  el canto o altura,  $E$  el módulo de elasticidad,  $\alpha$  la profundidad relativa de la entalla ( $a/D$ ), y  $G_f$  la energía de fractura para un espécimen de tamaño infinito (constante asintótica del material),  $C_f$  es la longitud de la zona de fractura del material, y

$$g'(\alpha) = \frac{dg(\alpha)}{d\alpha} \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$g(\alpha) = \left(\frac{S}{D}\right)^2 \pi\alpha[1.5F(\alpha)]^2$$

El procedimiento determinístico se detalla en (RILEM, 1991) y exige la realización de probetas geoméricamente similares en suficientes tamaños diferentes para poder generalizar una ley de tamaño, para cada una de las series de tamaños se estima la energía de fractura  $GF$ , la cual, una vez generalizada la ley, se transforma en  $G_f$ , que equivale a la energía específica del material para un espécimen de tamaño infinito.

En lo concerniente al presente trabajo no se consideró el modelo por lo siguiente:

- Al realizar los ajustes al trabajo de fractura medido y a la energía de fractura calculada para garantizar que ésta es consumida únicamente en el proceso de apertura y crecimiento de la fisura se reduce el efecto de tamaño en los experimentos. (ELICES et al., 1992a, ELICES et al., 1992b, ELICES et al., 1992c)
- Dado que el efecto tamaño está influenciado por la fragilidad/ductilidad del material, sucede que en los concretos reforzados con fibras el efecto tamaño se

---

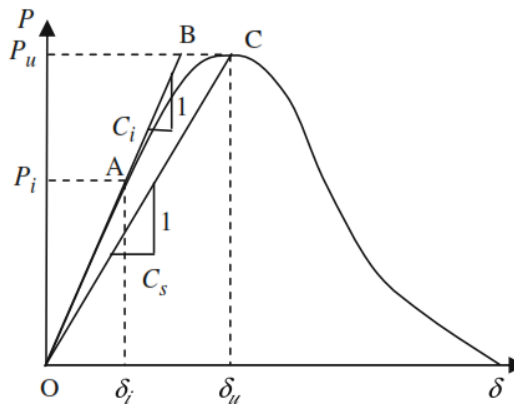
\* Entalladas, muescadas o ranuradas son equivalentes y corresponden al estado de prefisuramiento en las probetas con el fin de inducir un plano de fractura.



reduce conforme aumenta la ductilidad por la adición de fibras.(CIFUENTES, 2010)

- El procedimiento (RILEM, 1991) exige la construcción de probetas de diferentes tamaños y usualmente varias probetas de cada tamaño deberán ser falladas para reducir dispersión, dado que el alcance del presente trabajo contempla ensayos ante cuatro fenómenos diferentes se consideró inviable realizar el procedimiento, pero se realiza la recomendación para efectuar la investigación para cada uno de los fenómenos de manera independiente.

**1.3.5 Modelo de fisura equivalente – MGE.** El planteamiento del método consiste en encontrar una longitud efectiva de fisura que puede ser estimada a partir de un punto de inestabilidad en la rama descendente de una curva carga – CMOD (NALLATHAMBI y KARIHALOO, 1986), el objetivo principal es determinar la extensión de la fisura efectiva ( $\Delta a_c$ ) a través de una secante apropiada trazada sobre la curva carga – flecha en ensayos de flexión sobre vigas entalladas con carga central. Ver Figura 9. De acuerdo al modelo la fractura en la estructura ocurre cuando el factor de intensidad de esfuerzo ( $K_I$ ) llega al valor crítico cuando la longitud de la fisura alcanza  $a_c$ .



**Figura 9. Determinación de longitud de fisura efectiva**

Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

En la Figura 9  $P_i$  y  $\delta_i$  corresponden a cargas por debajo de la carga máxima, el factor de intensidad de esfuerzo correspondiente viene dado por:

$$K_I = \sigma_N \sqrt{a F(\alpha)} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde  $F(\alpha)$  es el factor geométrico que depende de la relación luz canto  $S/D$ , de la viga y es determinada mediante ensayos.

Para la fisura efectiva  $a_e$  los investigadores generalizaron la siguiente función para mezclas de concreto simple:

$$\frac{ae}{D} = B_1 \left( \frac{\sigma_{Nu}}{E} \right)^{B_2} \left( \frac{a_0}{D} \right)^{B_3} \left( 1 + \frac{d_a}{D} \right)^{B_4} \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde  $d_a$  es el tamaño máximo del agregado, y las constantes  $B_2$ ,  $B_3$  y  $B_4$  fueron encontradas experimentalmente para concreto simple.

El valor de factor de intensidad de esfuerzos crítico viene dado por:

$$K_{IC}^e = \sigma_{Nu} \sqrt{ae F(\alpha c)} \quad \text{Ec. 1.8}$$

El modelo no fue tenido en cuenta en el presente proyecto porque:

- Su objetivo principal no es encontrar la energía de fractura del concreto.
- Las constantes utilizadas para determinar el factor de intensidad de esfuerzo crítico  $K_{IC}$  fueron determinadas para mezclas de concreto simple (NALLATHAMBI y KARIHALOO, 1986) por lo cual será requerido el ajuste para las mezclas enriquecidas con fibra, y pudiera ser parte del alcance de una investigación adicional utilizando los valores del presente trabajo o con ensayos independientes.

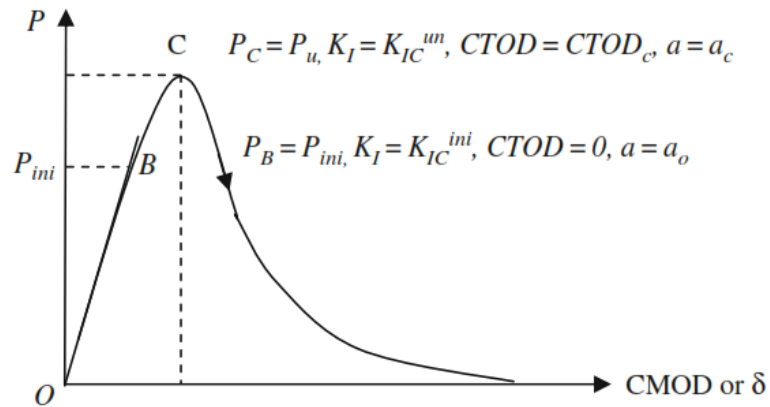
**1.3.6 Modelo de fractura doble K – MFDK.** El modelo propuesto por (XU y REINHARDT, 1999) reconoce tres etapas de propagación de fractura en el concreto:

- Iniciación de la fisura
- Propagación estable
- Propagación Inestable

Mientras que los modelos de fractura MFDP, MFET y MGE adaptados desde la mecánica de fractura lineal y elástica pueden únicamente predecir la fractura inestable de las estructuras, los modelos numéricos basados en el modelo de fisura cohesiva y los modelos de bandas de fisuras (MGC y MBG) muestran la fisuración, propagación de la fisura y la falla hasta que la máxima carga es alcanzada.

En la Figura 10 se representa el punto de inicio de fisuración donde la apertura en el frente de fisura CTOD es cero, en la práctica el inicio de fisuración debe ser medido por técnicas de interferometría óptica, recubrimiento fotoelástico, o tiras extensómetro (strain gauges). En la Figura 10 el punto B representa donde inicia el proceso de fractura lineal y el factor de intensidad de esfuerzo correspondiente. El modelo de fractura doble K se denomina así por los dos valores de factor de intensidad de esfuerzo que limitan las 3 etapas mencionadas:

$$K_{IC}^{ini} \text{ y } K_{IC}^{un} \quad \text{Ec. 1.9}$$



**Figura 10. Representación gráfica del inicio de fisuración**

Tomada de (KUMAR y BARAI, 2011)

El modelo no fue tenido en cuenta en el presente proyecto porque:

- Su objetivo principal no es encontrar la energía de fractura del concreto.
- El modelo requiere la determinación de funciones de peso para las vigas entalladas (KUMAR y BARAI, 2010) para determinar los factores de intensidad de esfuerzo en cuerpos fracturados bajo esfuerzos combinados. La ventaja de utilizar funciones de peso es que una vez establecida para un cuerpo fracturado bajo un mismo régimen de carga, factores de intensidad de esfuerzo para una misma geometría, y modo de fractura puede ser determinado a través de la misma función.
- Las etapas de fractura, así como los parámetros de fractura de inicio de fisuración estable e inestable pueden ser determinados en una investigación adicional con los resultados del presente trabajo y/o ensayos adicionales.

**1.3.7 Modelo de fractura doble G – MFDG** . El modelo de fractura doble G (XU y ZHANG, 2008) parte de la discusión acerca de los consumos de energía de fractura en diferentes etapas de la fisuración, explicada mediante fuerzas cohesivas, de manera similar al MFDK se indica que existen dos cantidades diferentes de energía de fractura consumida:

- Energía de fractura inicial estable
- Energía de fractura inestable

La diferencia equivale al consumo de energía en la zona de proceso de fractura FPZ, por cuenta de la transferencia cohesiva de fuerzas en las caras de la fisura. De acuerdo a los investigadores la energía inicial equivale a la energía cuando el material es totalmente elástico bajo la carga inicial que produce la fractura  $P_{ini}$  y la longitud inicial de fisura  $a_o$ , después de esa carga una nueva superficie fracturada empieza a formarse y empieza a

liberarse energía a través de la cohesión adicional, denominada energía de rotura cohesiva  $G_{IC}$  hasta que la condición crítica es alcanzada, en ese punto inicia la liberación de energía inestable.

Las energías de fractura del MFDG pueden convertirse a factores de intensidad de esfuerzo  $K_I$  del modelo Doble K a través de la relación:

$$K = \sqrt{EG} \quad \text{Ec. 1.10}$$

El procedimiento analítico para estimar los parámetros consiste en encontrar la energía de fractura inestable, la energía de fractura de rotura crítica cohesiva y por última la energía de fractura estable, por sustracción de las dos primeras, para ensayos de flexión sobre vigas entalladas con carga central.

$$G_{IC}^{un} = \frac{3 \left( P_u + \frac{mgS}{2} \right)^2 S^2}{4B^2D^3E} V'(\alpha_c) \quad \text{Ec. 1.11}$$

Donde  $P_u$  es la carga máxima,  $mg*S/2$  es la influencia del peso propio de la viga,  $S$  la luz,  $D$  la altura,  $B$  el ancho,  $E$  el módulo de elasticidad, y

$$V'(\alpha) = \frac{2\alpha}{(1+\alpha)^3} [5.58 - 19.57\alpha + 36.82\alpha^2 - 34.94\alpha^3 + 12.77\alpha^4] + \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^2 [-19.57 + 73.64\alpha - 104.82\alpha^2 + 51.08\alpha^3] \quad \text{Ec. 1.12}$$

Siendo  $\alpha_c$  la relación  $a/D$ , longitud de fisura crítica sobre canto.

La energía de fractura de rotura crítica cohesiva viene dada por:

$$G_{IC}^c = \frac{1}{a - a_0} \int_{a_0}^{ac} \int_0^w \sigma(w_x) dw dx \quad \text{Ec. 1.13}$$

Finalmente:

$$G_{IC}^{ini} = G_{IC}^{un} - G_{IC}^c \quad \text{Ec. 1.14}$$

El modelo no fue tenido en cuenta en el presente proyecto porque:

- El objetivo primordial del presente trabajo es medir la energía de fractura del concreto, el modelo doble G obtiene los valores de energía a través de una estimación basada en las cargas máximas registradas en los ensayos.
- Las constantes utilizadas para la deducción de la energía de fractura inestable y de rotura en la zona cohesiva son empíricas estimadas por los investigadores XU and ZHANG, (2008) para mezclas de concreto simple, por lo cual no son aplicables al concreto reforzado con fibras de acero, pues como se explica en el capítulo 0 la presencia de las fibras de acero modifica el modelo de fisura cohesiva por la acción de puenteo en las caras de la fisura.

## 2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

### 2.1 GENERALIDADES

Se procede a la exposición de las propiedades de los materiales utilizados para la preparación del concreto empleado en la investigación. Posteriormente se discute la metodología para el diseño de las mezclas y se presentan las composiciones de las mezclas que se prepararon para llevar a cabo el estudio.

### 2.2 AGREGADO GRUESO

El agregado grueso utilizado corresponde a grava común de forma angulosa irregular, suministrada y caracterizada en el laboratorio de suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito cuyas características relevantes se resumen a continuación:

**Tabla 2. Caracterización agregado grueso**

Masa Unitaria Suelta:	kg/m <sup>3</sup>	1354,8
Masa Unitaria Compacta:	kg/m <sup>3</sup>	1547,0
Densidad Aparente ( $\rho$ apa):	g/cm <sup>3</sup>	2.334
Densidad saturada y seca ( $\rho$ sss):	g/cm <sup>3</sup>	2.442
Absorción (CA):	%	4,60

En el ANEXO A se presenta el informe de laboratorio con la respectiva granulometría y los resultados de la caracterización.

El material se conservó acopiado en el exterior, en el patio de materiales de la ECI. Se requiere por tanto corrección por humedad del agregado el día de elaboración de cada una de las mezclas para ajustar el peso húmedo.

### 2.3 AGREGADO FINO

El agregado fino utilizado corresponde a arena de río lavada, procedente de Tocancipá (C/ marca) de grano medio a fino, adquirida en un depósito particular, caracterizada debidamente en el laboratorio de suelos de la ECI, cuyas características se resumen a continuación:

**Tabla 3. Caracterización agregado fino**

Masa Unitaria Suelta:	kg/m <sup>3</sup>	1498,8
Masa Unitaria Compacta:	kg/m <sup>3</sup>	1655,2
Densidad Aparente ( $\rho$ apa):	g/cm <sup>3</sup>	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho$ sss):	g/cm <sup>3</sup>	2.558
Absorción (CA):	%	1,20

Adicionalmente se estimó el módulo de finura como se presenta a continuación, utilizando la suma de las acumulaciones retenidas:

**Tabla 4. Pesos retenidos del agregado fino y cálculo del módulo de finura**

TAMIZ	mm	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% PESO RETENIDO (Corregido)	% PESO RETENIDO (Acumulado)	% PASA
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,00	0,00	100,0
1/2"	12,7	6,7	6,7	0,60	0,60	99
3/8"	9,53	16,8	16,8	1,40	2,00	98
1/4"	6,35	19,7	19,7	1,60	3,60	96
No 4	4,75	31,0	31,0	2,60	6,20	94
No 8	2,38	89,4	89,4	7,50	13,70	86
No 10	2	23,8	23,8	2,00	15,70	84
No 16	1,19	131,9	131,9	11,00	26,70	73
No 30	0,6	307,0	307,0	25,60	52,30	48
No 40	0,425	218,6	218,6	18,30	70,60	29
No 50	0,3	159,6	159,6	13,30	83,90	16
No 60	0,25	81,4	81,4	6,80	90,70	9
No 80	0,18	42,1	42,1	3,50	94,20	6
No 100	0,15	21,0	21,0	1,80	96,00	4
No 200	0,075	24,9	24,9	2,10	98,10	1,9
Fondo	0,075	1,5	1,5	1,90	100,00	-
Suma Pesos Retenidos (g) =			1175,4			

M. F. = **2,788**

Las celdas sombreadas corresponden a los pesos retenidos involucrados en el cálculo del módulo de finura.

En el ANEXO A se presenta el informe de laboratorio con la respectiva granulometría y los resultados de la caracterización.

El material se conservó acopiado en el exterior, en el patio de materiales de la ECI. Se requiere por tanto corrección por humedad el día de mezclado para ajustar el peso húmedo.

## 2.4 AGUA

Se empleó agua corriente proveniente de la red de abastecimiento de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

## 2.5 CEMENTO

Se utilizó cemento gris Portland tipo I convencional, marca Argos que cumple, de acuerdo a la ficha técnica del producto, con normas técnicas colombianas NTC121 y NTC 321. Ver ANEXO A.

## 2.6 FIBRA METÁLICA

Se utilizó en la preparación de las muestras un único tipo de fibra metálica, marca IMOCOM de producción nacional. El producto cumple normas ASTM A820-04 (ASTM, 2011) y NTC 5214 (ICONTEC, 2003). Ver ficha técnica en el ANEXO A.

Acorde a las citadas normas, la fibra metálica se identifica de acuerdo a la fuente del material de la fibra en una de estas cuatro clasificaciones así:

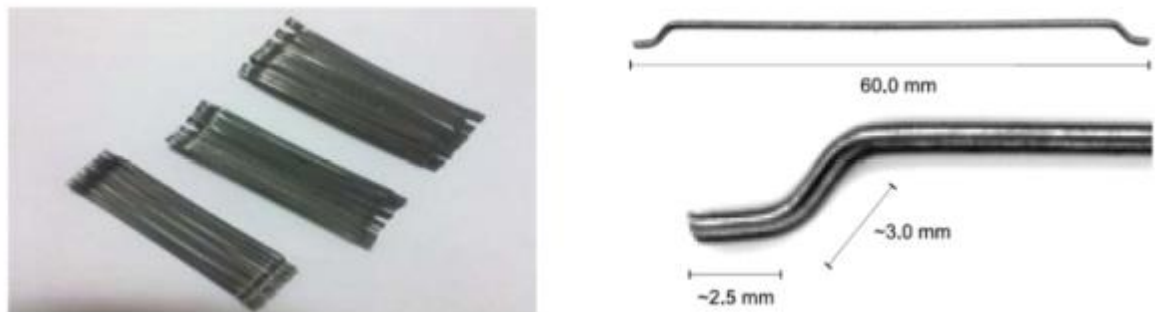
Tipo I, alambre estirado en frío

Tipo II, lámina cortada

Tipo III, obtenida por fundición

Tipo IV, otras fibras

La fibra empleada en el presente estudio corresponde al tipo I. A continuación las principales propiedades de la fibra empleada:



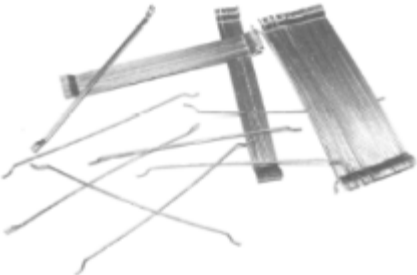
a)

b)

**Figura 11. Presentación de la fibra metálica IMOCOM 80/60**

a) Presentación pegada b) Detalle del gancho

**Tabla 5. Características físicas y mecánicas de la fibra metálica**

Diámetro (d)	0.75 mm ± 0.03 mm	
Longitud (L)	60 mm ± 0.03	
Relación de aspecto (L/d)	80	
Sección transversal	circular	
Referencia comercial	CHO 80/60	
Clasificación NTC 5214	I	
Resistencia mínima tensión	1100 MPa	
Acero	crudo, brillante, con bajo contenido de carbono	
Presentación	Pegada	

Fuente: Ficha técnica del fabricante de la fibra IMOCOM, ver ANEXO A.

La fibra pegada tiene como característica que al entrar en contacto con agua y empezar a mezclar se desprende quedando en su presentación individual, manualmente se despega también sin mayor esfuerzo.

## 2.7 ADITIVO

Debido a la conocida pérdida de manejabilidad en los concretos adicionados con fibra metálica (ACI, 2008) se requiere la utilización de un aditivo superplastificante o fluidificante. Para el presente trabajo se utilizó superplastificante de alto rango, en ese sentido se seleccionó y utilizó el producto PLASTOL 6000 del fabricante TOXEMENT, el cual cumple la clasificación ASTM C1017 tipo I y II, con incrementos de revenimiento hasta de 9 cm, de acuerdo a dosificación.

Conforme a las recomendaciones de uso del producto se agregó en cantidades desde 50 g hasta 220 g sin superar nunca el 0.5% del peso del cementante con el fin de no afectar la relación agua cemento a/c. La función deseada fue fluidificante, no reductor de agua. Ver ficha técnica en el ANEXO A.



### 3 DISEÑO DE MEZCLAS

Conforme al alcance del proyecto se fijó la preparación de 15 diferentes mezclas de concreto, de la siguiente manera:

- 3 mezclas de prueba con la misma relación  $a/c$ , con variaciones de cuantía volumétrica de fibra de acero  $\rho_f = 0\%$ ,  $1.0\%$  y  $2.0\%$ . El objetivo de la mezcla de prueba es establecer la manejabilidad de la mezcla y ajustar la cantidad de plastificante requerido. Las mezclas se denominaron Serie P.
- 4 mezclas de resistencia a la compresión  $f'_c$  (28 MPa aprox) (fijada a partir de una relación fija de  $a/c = 0.50$ ) y con variación de cuantía de acero  $\rho_f = 0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$  y  $1.5\%$ . Las mezclas se denominaron Serie A.
- 4 mezclas de resistencia a la compresión  $f'_c$  (21 MPa aprox) y con variación de cuantía de acero  $\rho_f = 0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$  y  $1.5\%$ . Las mezclas se denominaron Serie B.
- 4 mezclas de resistencia a la compresión  $f'_c$  (35 MPa aprox) y con variación de cuantía de acero  $\rho_f = 0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1.0\%$  y  $1.5\%$ . Las mezclas se denominaron Serie C.

#### 3.1 MEZCLAS DE PRUEBA

Se planteó el piloto experimental con la elaboración y ensayo de (3) mezclas de prueba con cuantías volumétricas ( $\rho_f$ ) de fibras cortas de acero IMOCON 80/60\* al  $1.0\%$ ,  $2.0\%$  y adicional una mezcla en concreto simple.

Acorde a las recomendaciones del comité se adoptó vincular el diseño de mezclas a relaciones agua cemento ( $w/c$ ), dado que no es fácil obtener una resistencia uniforme para una mezcla con diferentes cuantías de fibra. Para el piloto experimental se adoptó una relación agua-cemento ( $w/c$ )=0.50, la cual resulta conveniente en el momento de buscar diseños de mezcla objetivo utilizando por ejemplo el método del reproporcionamiento para mezclas SFRC, (NATARAJA et al., 2005)

Para el diseño de las mezclas de concreto simple se tomó como referencia el método del ACI 211.1 (ACI, 1991) mientras que para el concreto adicionado con fibra de acero es necesario tener en cuenta además los requisitos del ACI 544.08 (ACI, 2008) y como complementó se consultaron las recomendaciones acerca de la dosificación de mezclas de concreto con fibras de acero de (NATARAJA et al., 2005) y (ALMANSA y CANOVAS, 1997)

---

\* Longitud 60mm, Diámetro 0.75 mm, Relación de aspecto 80.

Con el fin de determinar requerimientos para la elaboración de las muestras, montajes y manejabilidad de las muestras se elaboraron mezclas de prueba, cuya dosificación se relaciona en la Tabla 6.

En el ANEXO B se presenta la ficha con el diseño detallado de todas las mezclas que hicieron parte del trabajo.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los ensayos de compresión, en el caso de las mezclas de prueba no incluyó instrumentación.

**Tabla 6. Dosificación mezclas de prueba**

Ingrediente	Peso seco (kg/m <sup>3</sup> )		
	M.P00	M.P10	M.P20
Cemento (C)	432,0	432,0	432,0
Agua (W)	216,0	216,0	216,0
Contenido de aire	0,0	0,0	0,0
Agregado Grueso (G)	857,0	844,4	831,0
Agregado Fino (S)	730,7	690,8	679,9
Superplastificante	0	0	6,5 cc/kg cemento
Fibra metálica	0	80,0	160,0

**Tabla 7. Resistencia a la compresión en las mezclas de prueba**

Test	Probeta	Edad días	D mm	L mm	A mm <sup>2</sup>	Pu (N)	Tipo de falla	f'c MPa	Promedio MPa
15/05/2012	P00-1	28	101	200	8012	204256	Corte	25.5	
15/05/2012	P00-2	28	100	200	7854	220950	Corte	28.1	26.8
08/05/2012	P10-1	20	99	200	7698	166702	Cono/corte	24.5	
10/05/2012	P10-2	20	100	202	7854	186314	Cono/corte	26.8	25.6
08/05/2012	P20-2	18	100	202	7854	204945	Cono/corte	30.4	
08/05/2012	P20-1	18	100	200	7854	192198	Cono/corte	28.5	28.5

Con la resistencia a la compresión encontrada en las mezclas de prueba se verificó la resistencia promedio en 27 MPa y se optó por fabricar las mezclas del proyecto de la siguiente forma:

- Una mezcla "A" con la misma relación agua/ cemento que la mezcla de prueba.
- Una mezcla "B" con una relación a/c mayor que la mezcla A, y
- Una mezcla "C" con una relación a/c menor que la mezcla A.

Aplicando la recomendación de dosificación de (NATARAJA et al., 2005) para mezclas de concreto enriquecidas con fibra se tienen dos expresiones:

$$\left\{ \frac{S}{S_0} \right\} = -0.2 + 0.6C \text{ para } S \geq 30 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$\left\{ \frac{S}{S_0} \right\} = -0.73 + 0.865C \text{ para } S < 30 \text{ MPa}$$

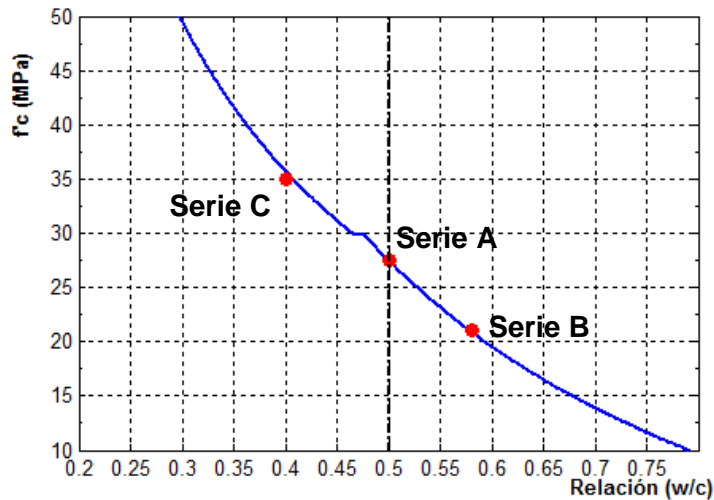
Donde:

S es la resistencia objetivo

$S_0$  la resistencia patrón con relación a/c = 0.5, y

C es el inverso de la relación a/c requerida para la resistencia objetivo.

De acuerdo a las expresiones anteriores las relaciones a/c para las mezclas B y C se estiman en 0.40 para  $f'_c$  35 MPa y 0.58 para  $f'_c$  21 MPa.



**Gráfica 1. Relación agua cemento – resistencia a la compresión**

Adaptada a partir de (NATARAJA et al., 2005)

### 3.2 CODIFICACIÓN DE MEZCLAS

La codificación de mezclas y probetas, se realizó de la siguiente manera:

**M. \$ pf - #**

Donde:

M: Mezcla

\$: Serie de probetas pertenecientes a la mezcla (P- Prueba; A, B o C)

pf: Cuantía volumétrica de fibras cortas de acero (00, 05, 10 y 20)

#: Identificación del espécimen de prueba, indistintamente del ensayo (flexión, compresión, corte, tracción)

Ejemplos:

MP20-1 (Mezcla de Prueba  $\rho_f = 2.0\%$ , probeta 1)

MA05-5 (Mezcla tipo A,  $\rho_f = 0.5\%$ , probeta 5)

### 3.3 MEZCLAS DEFINITIVAS

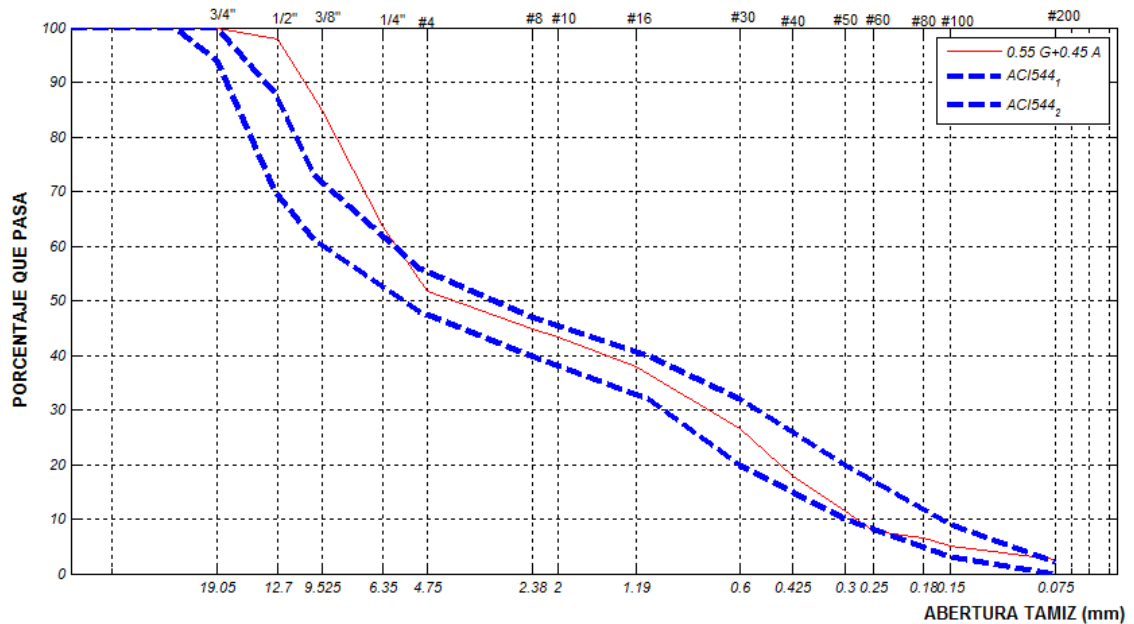
Conforme a los procedimientos estandarizados para el diseño de mezclas se determinaron los siguientes valores comunes para todas las mezclas, a partir de la caracterización de los materiales, ver ANEXO A, y de las recomendaciones del ACI 211.1 (ACI, 1991) y ACI 544.08 (ACI, 2008):

1. Tamaño máximo nominal de los agregados TMN	12.7mm
2. Elección Asentamiento	75 – 100mm (ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.1.)
3. Contenido de aire estimado	2,5% (ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.)
4. Contenido de agua de mezclado	216 Kg/m <sup>3</sup> (ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.)
5. Módulo de finura del agregado fino	2.79
6. Relación agregado grueso seco y apisonado por volumen de concreto	0.55 (ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.6.)
7. Máxima dosificación del hiperplastificante	0.5% del peso del cementante

La estimación de relaciones agua – cemento, contenido de cemento, contenido de agregado fino, humedades de campo y ajuste de los volúmenes se presentan en detalle para cada una de las (15) mezclas preparadas, en el ANEXO B.

En la Gráfica 2, se compara la granulometría de los agregados combinados utilizados contra las granulometrías límite recomendadas en la tabla 4.2 del ACI 544.08 (ACI, 2008).

La recomendación indica mantener la combinación dentro del rango debido a que en el concreto fibroreforzado es necesario un contenido de finos suficiente de manera que permita la manejabilidad de la muestra y la lubricación de la interface agregados, pasta de cemento y fibras metálicas. Como se observa en la figura los porcentajes de grava 55% y arena 45% satisfacen el cumplimiento de la recomendación para los tamices menores de la granulometría, mientras que una leve desviación se produce en los tamaños superiores.



**Gráfica 2. Gradación de los agregados combinados**

Con cada una de las mezclas se elaboraron las probetas cilíndricas y prismáticas para los diferentes ensayos de fractura propuestos. En total se fabricaron (192) probetas discriminadas como se indica en la Tabla 8. Durante la investigación surgió la propuesta de realizar unas probetas cilíndricas adicionales para verificar la resistencia a compresión de la mezcla si la fibra metálica era removida manualmente antes del fraguado. En la Tabla 9 se resumen las cantidades de materiales consumidas para el proyecto.

**Tabla 8. Resumen de las probetas fabricadas**

Mezcla	Fecha elaboración	Cilindros compresión	Cilindros tracción	Viguetas cortante	Viguetas flexión con carga central
M.P00	17-abr-12	2	-	-	2
M.P10	18-abr-12	2	-	-	2
M.P20	20-abr-12	2	-	-	2
M.A00	12-may-12	4	4	3	3
M.A05	12-may-12	4	4	3	3
M.A10	26-may-12	4	4	3	3
M.A20	26-may-12	4	4	3	3
M.B00	02-jun-12	4	4	3	3
M.B05	02-jun-12	6	4	3	3
M.B10	16-jun-12	6	4	3	3
M.B20	16-jun-12	6	4	3	3
M.C00	07-jul-12	4	4	3	3
M.C05	07-jul-12	6	4	3	3
M.C10	28-jul-12	6	4	3	3
M.C20	28-jul-12	6	4	3	3
		66	48	36	42

**Tabla 9. Consumo de materiales en las mezclas**

MEZCLA	Fecha elaboración	Cemento (C)	Agregado Grueso (G)	Agregado Fino (S)	Fibra de acero (SF)	Plastificante (SP)
M.P00	17-abr-12	15,6	32,9	28,1	0,0	0,000
M.P10	18-abr-12	13,3	26,9	22,5	2,5	0,000
M.P20	20-abr-12	13,3	27,3	22,2	4,9	0,300
M.A00	12-may-12	48,8	100,3	82,5	0,0	0,000
M.A05	12-may-12	45,0	92,5	76,1	4,2	0,000
M.A10	26-may-12	45,0	91,6	75,2	8,3	0,104
M.A20	26-may-12	45,0	90,2	74,0	16,7	0,264
M.B00	02-jun-12	40,4	96,5	89,4	0,0	0,000
M.B05	02-jun-12	41,9	99,9	91,1	4,5	0,000
M.B10	16-jun-12	41,9	100,1	90,1	9,0	0,000
M.B20	16-jun-12	41,9	100,1	87,1	18,0	0,204
M.C00	07-jul-12	58,6	96,5	73,3	0,0	0,000
M.C05	07-jul-12	60,7	100,0	74,4	4,5	0,000
M.C10	28-jul-12	60,7	100,0	73,0	9,0	0,000
M.C20	28-jul-12	60,7	100,0	70,0	18,0	0,000
<b>TOTAL (Kg)</b>		<b>632,8</b>	<b>1254,8</b>	<b>1028,8</b>	<b>99,5</b>	<b>0,9</b>

En cada uno de los capítulos siguientes se detalla la fabricación de las probetas, el montaje de los ensayos de fractura y los resultados de los ensayos utilizados para determinar el parámetro de fractura buscado.

## 4 COMPORTAMIENTO EN COMPRESIÓN

La fractura de concreto a compresión no corresponde a ninguno de los modos específicos de fractura indicados en el numeral 1.2.1. Las probetas presentan por lo general modos de fractura mixtos con apertura de fisuras dispersas internas y en superficie de difícil medición por medio de instrumentación. (SHAH et al., 1995)

En el estudio experimental de (NEVES y FERNANDES, 2005) se concluyó que la adición de fibras de acero no incrementa la resistencia final de las mezclas, sin embargo, en ocasiones distorsiona los valores pico y aumenta la dispersión de resultados entre probetas.

En el presente estudio se propone para los ensayos de compresión:

- Establecer la variación de la resistencia a la compresión de las mezclas con la adición de fibras de acero.
- Medir la ganancia de tenacidad de la mezcla, a través de la energía de fractura del concreto a compresión, la cual se denominará  $G_F^C$

### 4.1 EFECTO DE LAS FIBRAS A COMPRESIÓN

Con base en el estudio sobre ductilidad en columnas con adición de fibra metálica (FOSTER, 2001) propuso un modelo para incluir el aporte de la fibras. Las fibras metálicas actúan por medio del efecto de 'cosido' <sup>1</sup> entre dos caras de fisura mejorando el desempeño posterior a la formación de la fisura. El refuerzo efectivo provisto por la fibra es de  $\rho_f / 2$ , donde  $\rho_f$  es la cuantía volumétrica de fibra (ZAINA, 2005), véase Figura 12. Ello se debe a la hipótesis de que únicamente las fibras con un ángulo  $\theta$  entre  $30^\circ$  y  $90^\circ$  proveen el efecto de cosido suficiente para mejorar el desempeño, (FOSTER, 2001).

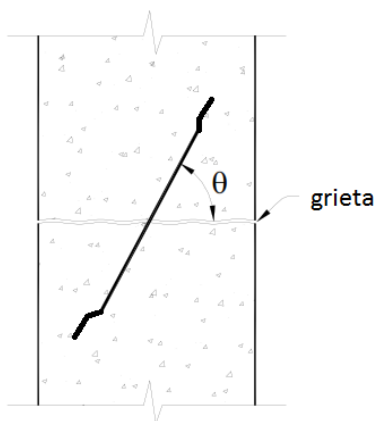


Figura 12. Efecto de cosido en control de fisura

Adaptado de (ZAINA, 2005)

<sup>1</sup> Adaptación libre del término bridging, ó de amarre entre las caras de la fisura.

En la construcción de las probetas cilíndricas se verificó una orientación predominante hacia el alto de la probeta, lo cual supone un aprovechamiento mejor que el obtenido por una columna común.

El trabajo experimental de (MARTI et al., 1999) sugiere que la adición de fibras provee una presión de confinamiento, determinada en el trabajo como:

$$P_f = \frac{3}{8} \alpha V_f \tau b \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde  $P_f$  es la presión de confinamiento,  $\alpha$  es la relación de aspecto de la fibra ( $l/d$ ),  $V_f$  es la cuantía volumétrica de fibra, y  $\tau b$  es la resistencia al corte de la fibra anclada a las dos caras de la fisura. (MARTI et al., 1999) sugiere una aproximación de:

$$\tau b = 0.6 (f'c)^{2/3} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Tanto la resistencia al cortante de la fibra anclada, como los valores de presión confinamiento se obtienen experimentalmente y son utilizadas en el trabajo de ZAINA (ZAINA) para evaluar la ductilidad ganada en columnas con adición de fibra metálica.

A continuación se procede a determinar la resistencia a la compresión de las probetas a los 28 días y la energía de fractura a compresión de las muestras.

## 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se destinaron (4) cilindros de  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  por cada una de las (12) mezclas definitivas, adicionalmente se destinaron (2) cilindros testigos adicionales para las mezclas adicionadas con fibra, a dichos testigos se les extrajo manualmente la fibra metálica.

**4.2.1 Fabricación de probetas.** La elaboración, curado y método de ensayo de los cilindros de concreto para ensayos de compresión cumplió con lo dispuesto en la norma técnica colombiana NTC 673 (ICONTEC, 2010), adopción idéntica del ASTM C39. En la Fotografía 1 se ilustra la elaboración de probetas.

La razón de destinar testigos sin fibra, elaborados a partir de mezclas con fibra, era contar con una mezcla idéntica a la que tenía fibra, producida en el mismo instante y con las mismas proporciones y adiciones, incluido el superplastificante, el cual en condiciones normales no se requería para las mezclas de concreto simple. En la Fotografía 2 se muestra el método de extracción manual de la fibra para los cilindros testigos.





**Fotografía 1. Construcción probetas cilíndricas**



**Fotografía 2. Testigos de concreto simple con retiro manual de fibra**

La extracción manual de fibras fue exitosa, aunque dispendiosa, sin embargo se encontraron entre 0 y 4 fibras individuales entre los fragmentos de esas probetas testigo.

La totalidad de las probetas se fabricaron el día sábado y fueron desencofradas el lunes a primera hora, luego de lo cual se curaron en la piscina por un lapso de al menos 28 días, en la Tabla 10 se presenta la relación de las fechas de fabricación y rotura de los cilindros. Nótese que para algunas muestras la edad de falla superó los 28 días, la razón de ello es que conforme las mezclas fabricadas adquirían mayor tenacidad aumentaba el tiempo de falla de las probetas, haciendo imposible fallar los cilindros en la misma jornada que las vigas, haciéndose necesario postergar los ensayos de compresión unos días adicionales. Sin embargo se garantizó que la resistencia al concreto medida fuera igual o superior a  $f'c$ .

**Tabla 10. Fechas de fabricación y rotura de las probetas cilíndricas**

Serie	Cilindros	Elabora	Ensayo	Edad (d)	Serie	Cilindros	Elabora	Ensayo	Edad (d)
M.A00	4	12-may-12	09-jun-12	28	M.B10	6	16-jun-12	21-jul-12	35
M.A05	4	12-may-12	09-jun-12	28	M.B20	6	16-jun-12	21-jul-12	35
M.A10	4	26-may-12	23-jun-12	28	M.C00	6	07-jul-12	10-ago-12	34
M.A20	4	26-may-12	23-jun-12	28	M.C05	6	07-jul-12	10-ago-12	34
M.B00	4	02-jun-12	05-jul-12	33	M.C10	6	28-jul-12	29-ago-12	32
M.B05	6	02-jun-12	05-jul-12	33	M.C20	6	28-jul-12	29-ago-12	32

**4.2.2 Ensayo de las muestras.** Inicialmente se contempló la rotura de cilindros en la máquina universal de ensayos de compresión y con los deformímetros análogos de 1/25" de precisión, realizar lecturas de deformación axial, de esa manera se llevaron a cabo los

ensayos de las mezclas A00 y A05, sin embargo una vez procesados los datos se evidenció que era imposible leer datos con precisión de la deformación en el tramo de descarga, posterior a la falla, por la rapidez con que se sucedía y, de otra parte, se requería obtener una curva de respuesta post-pico hasta el colapso total de la probeta.

Se tomó entonces la decisión de realizar los ensayos en la máquina Universal Shimadzu UT-100 A con celda de 100 Ton de capacidad, utilizando la celda de carga de 50 Ton, montaje con el cual se completó el trabajo. Como medida de precaución para el equipo de laboratorio se abandonó la instalación de deformímetros digitales LVDT, registrando la curva de respuesta de las muestras en su totalidad con la máquina universal. En la Fotografía 3 se ilustra el primer montaje y el montaje definitivo empleado para estimar la resistencia a compresión de las muestras.

Como es usual en los ensayos sobre cilindros, las muestras de mayor resistencia fallaron súbita y explosivamente.

Una de las observaciones que se constataron al momento de las roturas de probetas, es que un importante porcentaje de las fibras de acero tienden a orientarse longitudinalmente con el cilindro disminuyendo de esta manera la efectividad para el microrefuerzo transversal que se desea.



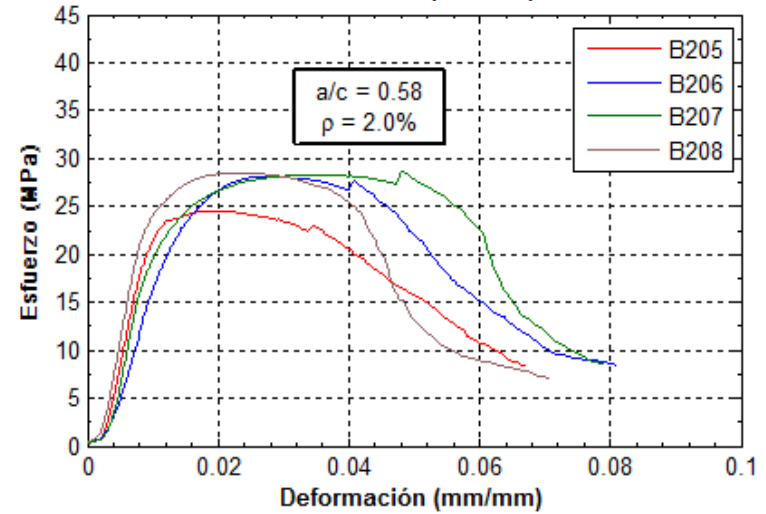
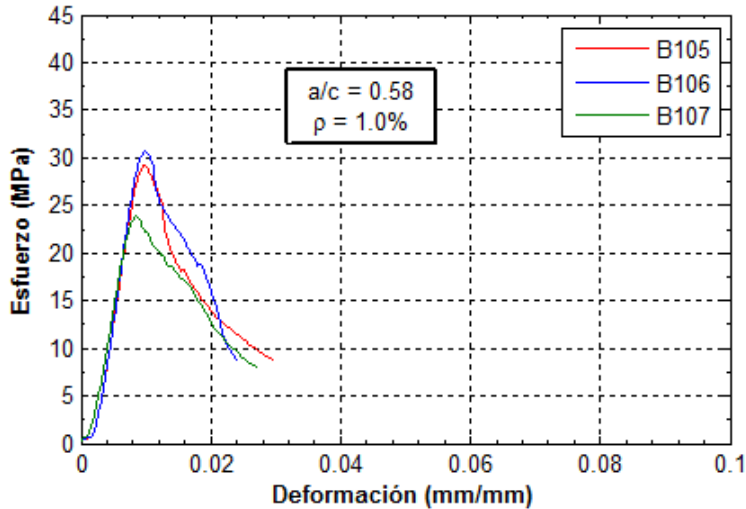
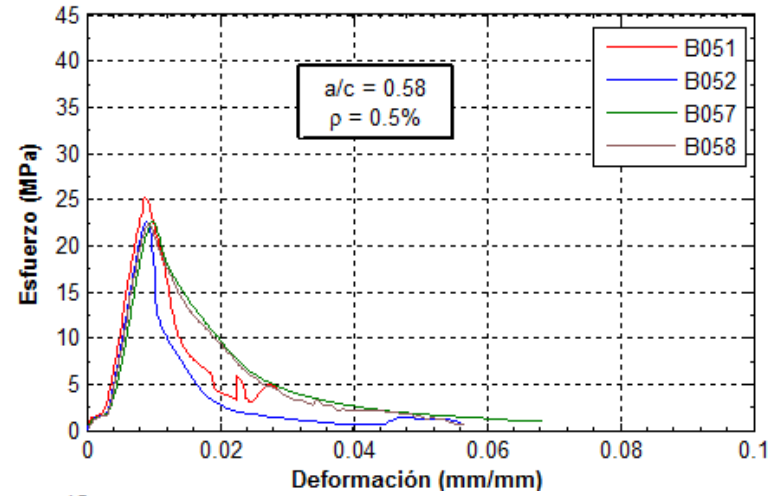
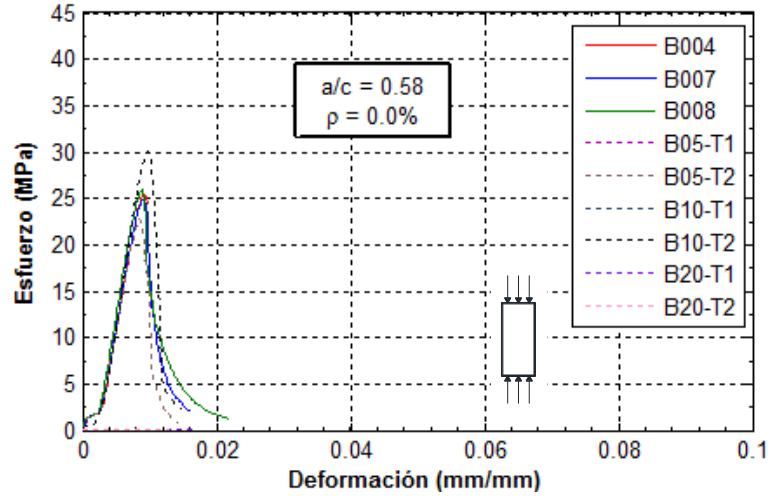
Fotografía 3. Montaje del ensayo a compresión concreto SFRC

#### 4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Desde la Gráfica 3 hasta la Gráfica 5 se presentan las gráficas esfuerzo - deformación obtenidas de los ensayos. Al igual que en otros capítulos se presentan en el orden B, A, C en orden ascendente de la resistencia a compresión obtenida.

A cada una de las probetas analizadas se le tomó la medida de diámetro y longitud, el cálculo de los esfuerzos máximos de compresión alcanzados por las muestras se presenta en la Tabla 11 para la serie B, Tabla 12 para la serie A y Tabla 13 para la serie C, el compendio de las resistencias a compresión alcanzadas por las muestras se presenta en la Tabla 14.

### 4.3.1 Serie B



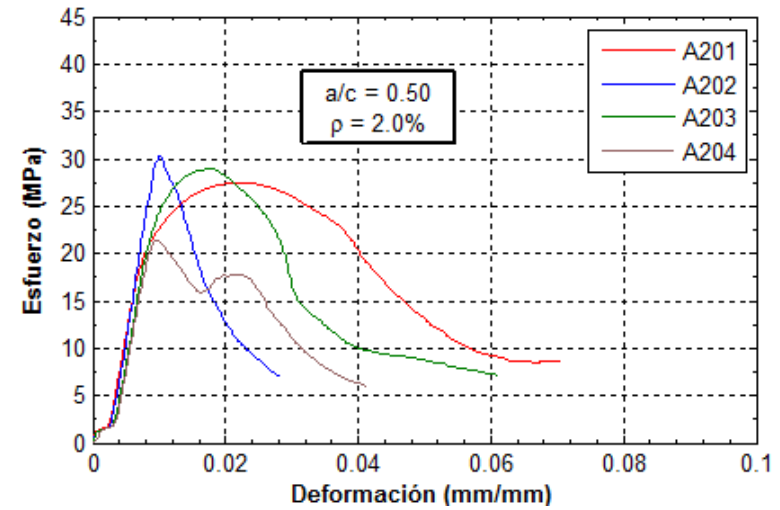
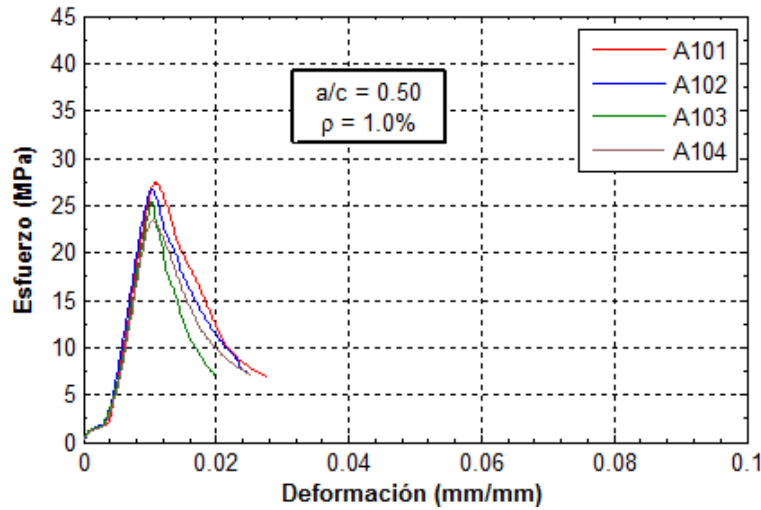
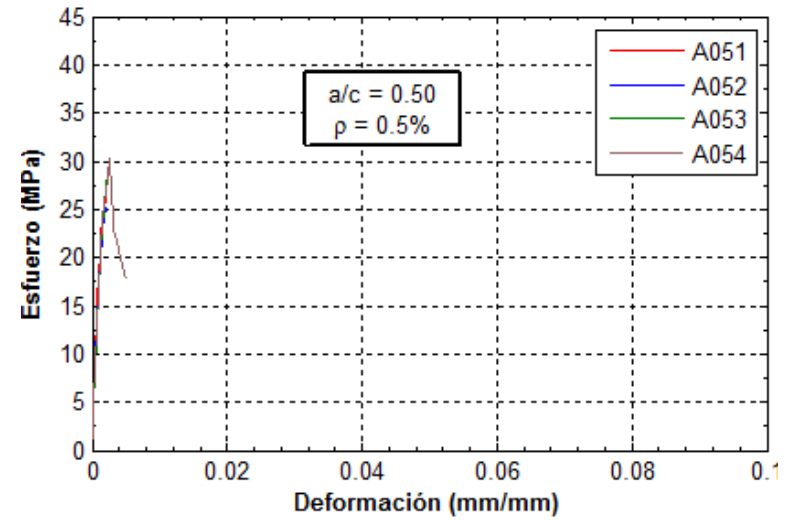
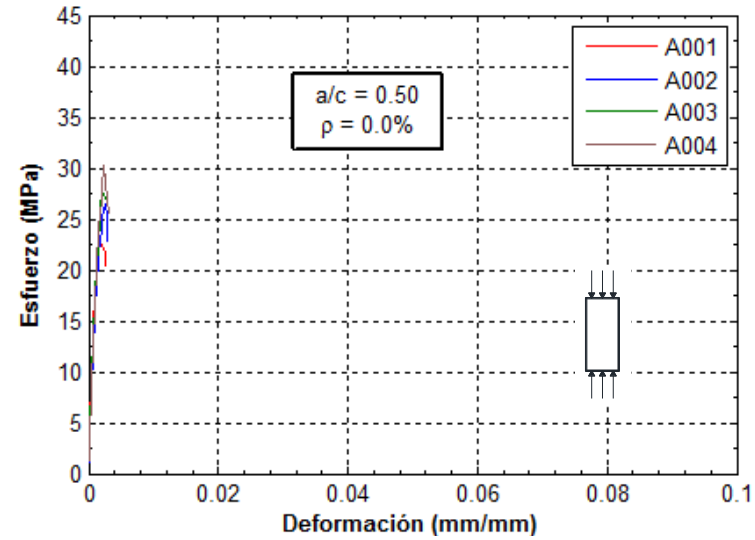
Gráfica 3. Comportamiento en compresión de las probetas Serie B

Se observa claramente cómo para la series B05, B10 y B20 las fibras otorgan ductilidad adicional, comparado con los testigos a los que se le retiró la fibra.

**Tabla 11. Resistencia a la compresión probetas serie B**

Probeta	Edad	D (cm)	L (cm)	Pu (Kg)	f'c (MPa)	f'c <sub>media</sub> (MPa)	$\sigma$	CV
B00-4	33	10.0	19.9	20,390	25.5			
B00-7	33	9.9	20.0	19,600	25.0			
B00-8	33	10.1	20.1	21,160	25.9			
B05-T1	35	10.0	20.0	18,240	22.7			
B05-T2	35	10.0	20.0	18,240	22.7			
B10-T1	35	10.0	19.9	23,170	28.8			
B10-T2	35	10.1	20.0	24,550	29.9			
B20-T1	35	10.0	19.9	20,360	25.3			
B20-T2	35	10.1	20.0	19,050	23.2	25.4	2.40	9.4%
B05-1	33	10.0	20.0	20,190	25.3			
B05-2	33	10.1	20.0	18,528	22.7			
B05-7	33	10.0	20.0	18,156	22.7			
B05-8	33	10.2	20.2	18,604	22.4	22.6	0.16	0.7%
B10-5	35	9.9	20.0	22,880	29.0			
B10-6	35	10.0	20.0	24,560	30.5			
B10-7	35	10.1	20.0	19,490	23.7			
B10-8	35	10.1	20.2	25,700	31.3	27.7	2.90	10.5%
B20-5	35	10.2	20.4	20,450	24.4			
B20-6	35	10.2	20.1	23,420	28.0			
B20-7	35	10.1	20.0	23,070	28.1			
B20-8	35	10.2	20.0	23,770	28.4	26.8	1.70	6.3%

### 4.3.2 Serie A



Gráfica 4. Comportamiento en compresión de las probetas Serie A

En el caso de las mezclas A05, A10 y A20 no se elaboraron testigos con retiro de fibra, dicha práctica se inició a partir de la mezcla B y en la C también se realizó.

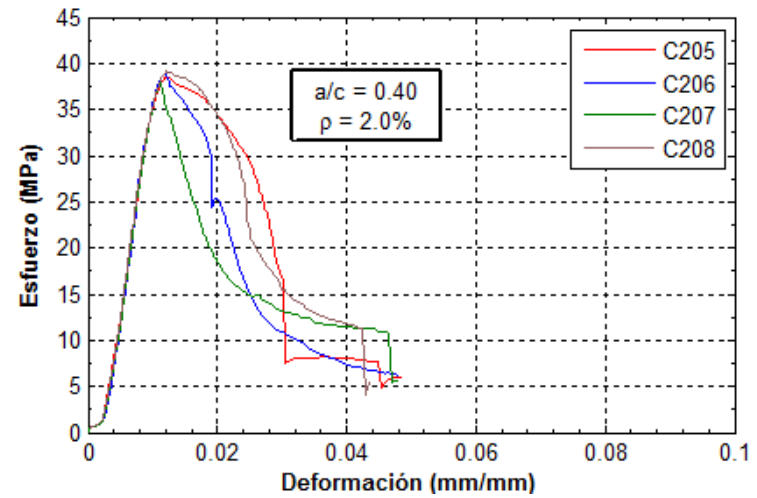
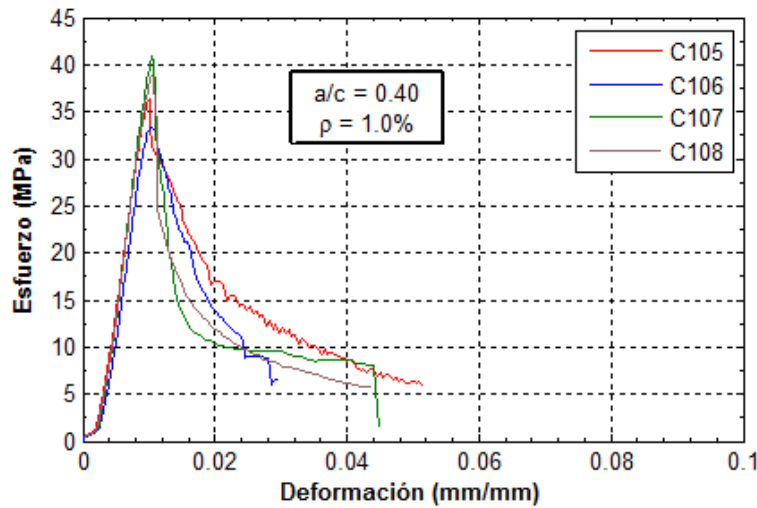
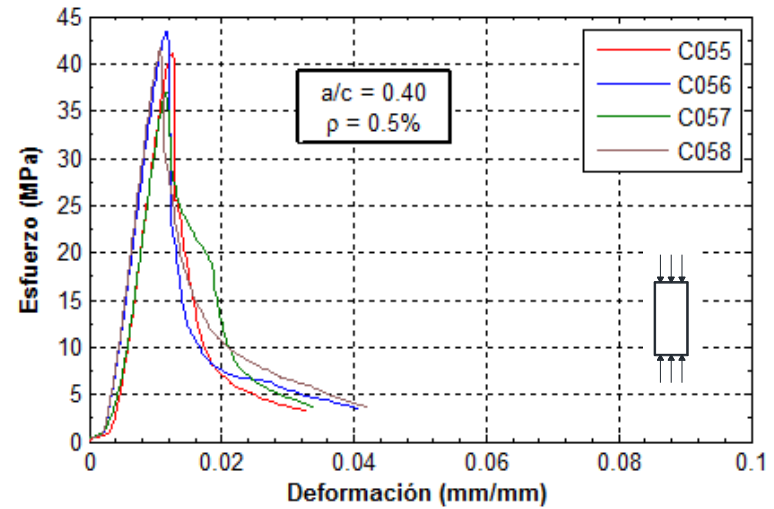
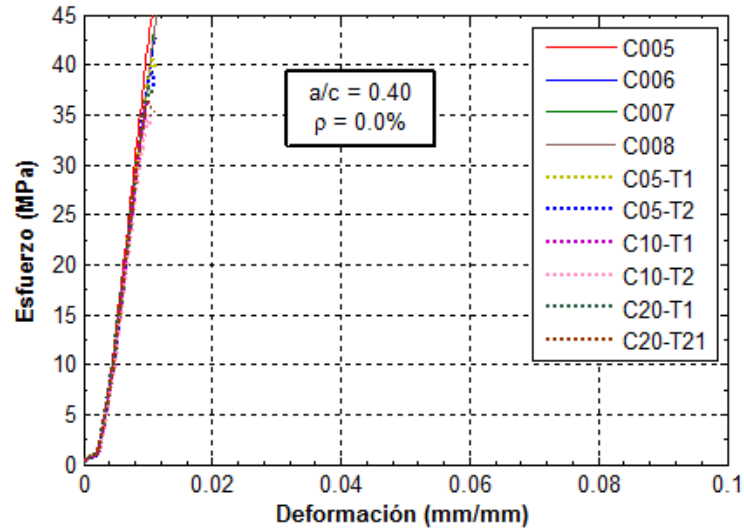
Sin embargo se puede constatar el incremento de la ductilidad en las probetas con adición de fibras, siendo en este caso más evidente con las adiciones de 1.0% y 2.0%.

**Tabla 12. Resistencia a la compresión probetas serie A**

Probeta	Edad	D (cm)	L (cm)	Pu (Kg)	f'c (MPa)	f'c <sub>media</sub> (MPa)	$\sigma$	CV
M.A00-1	28	9.9	19.9	18,200	23.6			
M.A00-2	28	10.2	20.3	22,000	26.9			
M.A00-3	28	10.1	20.2	22,800	28.5			
M.A00-4	28	9.9	20.0	23,800	30.9	27.5	2.01	7.3%
M.A05-1	28	10.0	20.1	21,000	26.7			
M.A05-2	28	10.2	20.1	21,400	26.2			
M.A05-3	28	10.3	20.4	23,800	28.6			
M.A05-4	28	9.9	20.0	22,000	28.6	27.5	1.07	3.9%
M.A10-1	28	10.3	20.2	23,300	28.0			
M.A10-2	28	10.1	20.2	21,860	27.3			
M.A10-3	28	10.2	20.1	21,190	25.9			
M.A10-4	28	10.3	20.2	19,860	23.8	26.3	1.58	6.0%
M.A20-1	28	10.2	20.3	22,900	28.0			
M.A20-2	28	10.3	20.1	25,700	30.8			
M.A20-3	28	10.2	20.2	24,080	29.5			
M.A20-4	28	10.1	20.1	17,468	21.8	27.5	3.46	12.6%



### 4.3.3 Serie C



Gráfica 5. Comportamiento en compresión de las probetas Serie C

**Tabla 13. Resistencia a la compresión probetas serie C**

Probeta	Edad	D (cm)	L (cm)	Pu (Kg)	f'c (MPa)	f'c <sub>media</sub> (MPa)	$\sigma$	CV
C00-5	34	10.1	20.1	40,610	49.6			
C00-6	34	10.2	20.3	35,570	42.6			
C00-7	34	10.2	20.2	38,730	46.4			
C00-8	34	10.2	20.3	39,160	46.9			
C05-T1	34	10.0	19.9	32,430	40.4			
C05-T2	34	10.0	20.0	31,550	39.3			
C10-T1	32	10.1	20.2	29,890	36.8			
C10-T2	32	10.0	20.1	27,950	35.1			
C20-T1	32	10.2	20.0	31,460	38.0			
C20-T2	32	10.2	20.1	30,320	36.6	41.17	4.75	11.5%
C05-5	34	9.9	20.0	32,220	41.0			
C05-6	34	10.1	20.0	35,450	43.3			
C05-7	34	10.2	19.9	30,810	36.9			
C05-8	34	10.1	20.0	34,090	41.7	40.72	2.35	5.8%
C10-5	32	10.2	20.3	30,250	36.5			
C10-6	32	10.3	20.5	28,270	33.5			
C10-7	32	10.0	20.0	32,760	41.1			
C10-8	32	10.2	20.1	32,280	38.9	37.51	2.86	7.6%
C20-5	32	10.2	20.4	32,080	38.7			
C20-6	32	10.0	20.0	31,150	39.1			
C20-7	32	10.1	20.1	30,900	38.0			
C20-8	32	10.1	20.1	31,960	39.3	38.79	0.50	1.3%

Al igual que en las otras series, la adición de fibras otorga a las muestras capacidad de respuesta post-pico, es decir ductilidad. Nótese sin embargo, que las probetas testigo sin fibra fallan súbitamente, estallando una vez alcanzaron la carga máxima.

Se puede constatar el incremento de la ductilidad en las probetas con adición de fibras siendo en este caso más evidente con las adiciones de 1.0% y 2.0%.

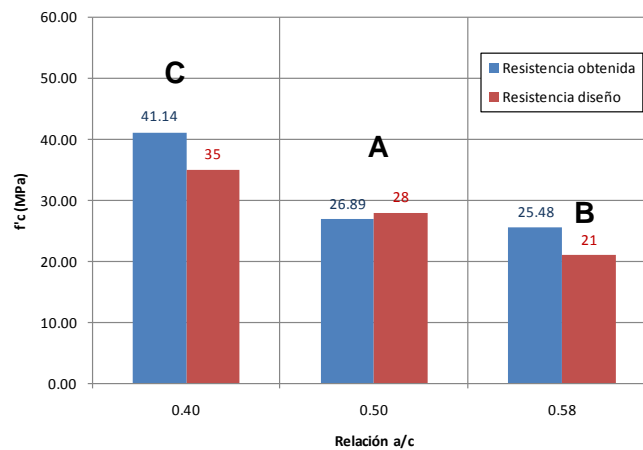
**4.3.4 Análisis de promedios.** De la Tabla 11 a la Tabla 13 se pueden comprobar los valores medios de resistencia para las probetas de una misma serie, se estiman además la desviación estándar y el coeficiente de variación de las muestras.

Es de notar además que los coeficientes de dispersión altos se presentan indistintamente entre probetas con fibra y sin fibra, no siendo atribuible entonces a la presencia de fibra metálica, o al superplastificante.

En la Tabla 14 y en la Gráfica 6 se presenta el análisis de las resistencias promedio obtenidas y su diferencia con respecto al valor esperado.

**Tabla 14. Resistencia a la compresión promedio de las series**

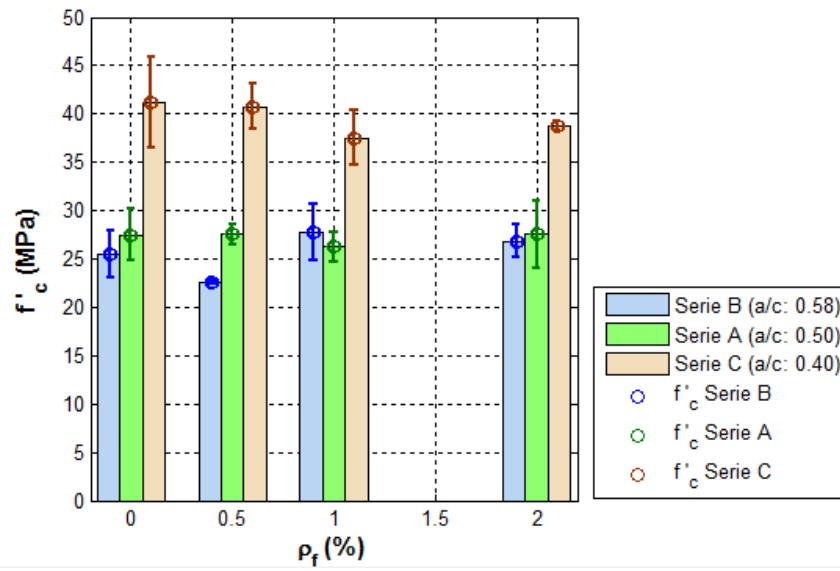
Serie	Relación a/c	f'c <sub>diseño</sub> (MPa)	f'c <sub>promedio</sub> (MPa)	Diferencia (MPa)	Diferencia %
B	0.58	21	25.5	4.5	21%
A	0.50	28	26.9	-1.1	-4%
C	0.40	35	41.1	6.1	17%



**Gráfica 6. Comparación resistencia esperada y obtenida**

La causa probable de la dispersión de la resistencia obtenida es debida a que las muestras B y C se fallaron a edades superiores a los 28 días, debido a la acumulación de ensayos de flexión, cortante y tracción, pues con el paso de los días debido al aumento de tenacidad en las probetas se extendían los tiempos de ensayo. Las muestras B y C se fallaron entre 32 a 35 días, las muestras A se fallaron a los 28 días.

En la Gráfica 7 se evidencia que la adición de fibra no incrementa f'c, incluso se presentan valores menores comparados con la mezcla de concreto simple, por dicha razón cuando se especifican concretos con fibra se requiere realizar un ajuste de resistencia mediante muestras de prueba para ajustar la relación a/c.



Gráfica 7. Variación de la resistencia con la adición de fibra

#### 4.4 ENERGÍA DE FRACTURA EN COMPRESIÓN

La energía de fractura en compresión se determinó mediante ensayos sobre las probetas cilíndricas, siendo de especial interés la respuesta post-pico de las muestras por lo cual se utilizó la máquina Universal Shimadzu UT-100A

Con base en el trabajo de (LEE y JACOBSEN, 2011) se propuso para el presente trabajo la medición de la energía de fractura en compresión hasta la carga última y la energía total hasta el colapso de la probeta y luego por sustracción determinar la energía de fractura post-pico, y de esta manera determinar si existe una ganancia en la tenacidad de las mezclas, lo cual resulta evidente por la comparación de las curvas esfuerzo – deformación entre muestras con y sin fibra. La energía de fractura total hasta el colapso viene dada por:

$$GF^c = GF_{\epsilon_c}^c + GF_{\epsilon_u}^c \quad \text{Ec. 4.3}$$

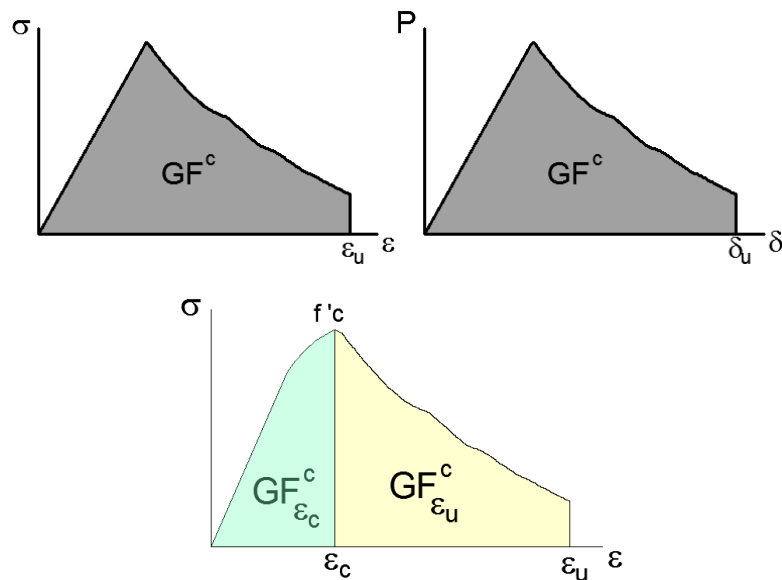


Figura 13. Esquema de la energía disipada a compresión

La energía de fractura, por definición se expresa como trabajo de fractura sobre unidad de área, en unidades  $[W / A]$  ej.  $(N \cdot m) / m^2$ , sin embargo es usual en los trabajos consultados que las unidades se hagan equivalentes a  $[F / L]$   $N/m$ , para el presente trabajo se continuará con esa notación pero expresando la energía de fractura en  $N/mm$ .

$$GF^c = \int_0^{\epsilon_u} \sigma d\epsilon * H \quad \text{Ec. 4.4}$$

Siendo H la altura de la probeta. La energía de fractura hasta la carga última es equivalente al módulo de resiliencia de la mezcla multiplicado por la altura de la probeta. La energía de fractura determinada de esa manera es equivalente al trabajo de fractura dividido por el área de la probeta como se muestra a continuación:

$$GF^c = \frac{WF}{A} = \frac{\int_0^{\delta_u} P d\delta}{A} \quad \text{Ec. 4.5}$$

En la Tabla 15 se presenta la evaluación de la energía de fractura.  $WF_{\epsilon_u}$  Es el trabajo de fractura hasta la rotura, o el módulo de resiliencia, En la Gráfica 8 se presenta la energía de fractura total de compresión, su composición y la dispersión del dato medio (desviación estándar de la muestra).

En la Gráfica 9 se resume y compara el comportamiento a la fractura entre las series de probetas, y se puede afirmar al respecto:

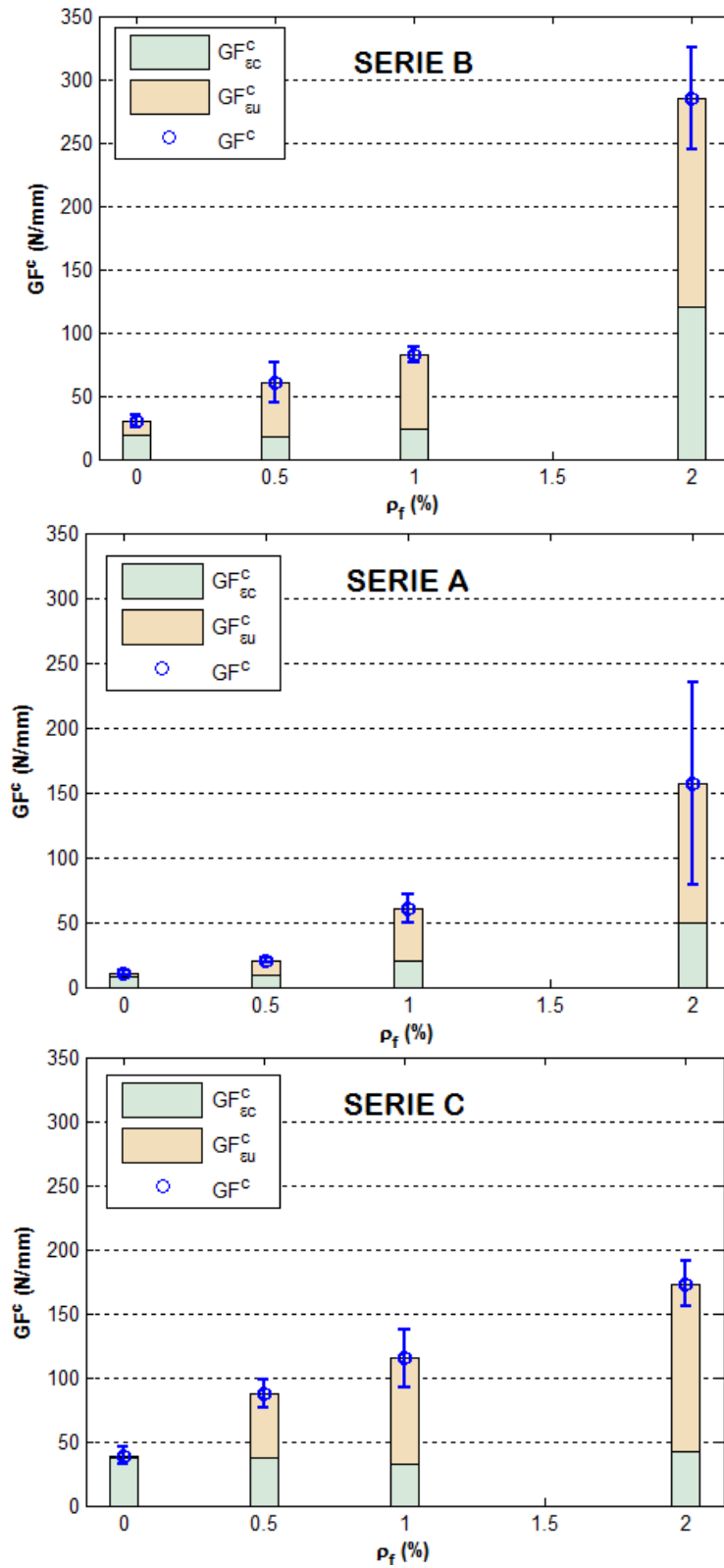
- Todas las mezclas obtienen un incremento importante en la energía de fractura con la adición de fibras de acero.
- La mezcla con menor resistencia obtenida presenta los mayores incrementos en energía de fractura y ganancia de ductilidad.
- La mayor dispersión en los valores de energía de fractura, indicada como la desviación estándar, entre paréntesis, es mayor en las mezclas con mayor contenido de fibra, 2.0%.
- Las mezclas A00 y A05 presentaron un pobre desempeño post-pico, pero se debe principalmente a la dificultad de medirlo, lo cual se subsanó con las mejoras en el montaje para el resto de las probetas.

Tabla 15. Energía de fractura en compresión

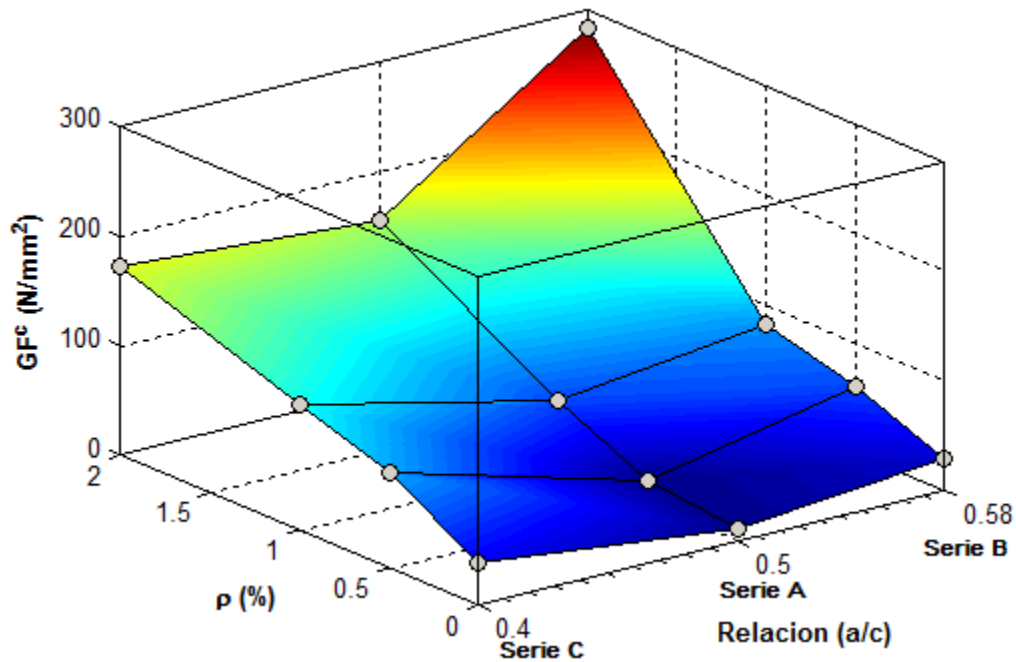
Probeta	L (mm)	f' <sub>c</sub> (MPa)	f' <sub>c</sub> media MPa	WF <sub>εc</sub> (N·mm/mm <sup>3</sup> )	WF <sub>εu</sub> (N·mm/mm <sup>3</sup> )	GF <sub>εc</sub> N/mm	GF <sub>εu</sub> N/mm	GF <sup>c</sup> N/mm	GF <sub>εc</sub> N/mm	GF <sub>εu</sub> N/mm	GF <sup>c</sup> N/mm	σ <sub>α</sub> N/mm	σ <sub>β</sub> N/mm	σ <sub>c</sub> N/mm
B00-4	199	25.5		0.0833	0.1092	16.58	5.15	21.73						
B00-7	200	25.0		0.0967	0.1528	19.34	11.22	30.56						
B00-8	201	25.9		0.0991	0.1821	19.92	16.68	36.60						
B05-T1	200	22.7		0.0808	0.1226	16.16	8.36	24.52						
B05-T2	200	22.7		0.0811	0.1225	16.22	8.28	24.50						
B10-T1	199	28.8		0.1026	0.1652	20.42	12.46	32.87						
B10-T2	200	29.9		0.1155	0.1757	23.10	12.04	35.14						
B20-T1	199	25.3		0.105	0.1625	20.90	11.44	32.34						
B20-T2	200	23.2	25.4	0.09	0.1342	18.00	8.84	26.84	18.96	10.50	29.46	2.40	3.29	5.24
B05-1	200	25.3		0.0892	0.2584	17.84	33.84	51.68						
B05-2	200	22.7		0.0820	0.2154	16.40	26.68	43.08						
B05-7	200	22.7		0.0878	0.3840	17.56	59.24	76.80						
B05-8	202	22.4	22.6	0.0817	0.3547	16.50	55.15	71.65	17.08	43.73	60.80	0.73	15.91	16.03
B10-5	200	29.0		0.1288	0.4417	25.76	62.58	88.34						
B10-6	200	30.5		0.137	0.41	27.40	54.60	82.00						
B10-7	200	23.7		0.0985	0.3769	19.70	55.68	75.38						
B10-8	202	31.3	27.7	nd	nd	-	-	-	24.29	57.62	81.91	4.06	4.33	6.48
B20-5	204	24.4		0.3076	1.1734	62.75	176.62	239.37						
B20-6	201	28.0		0.5086	1.5015	102.23	199.57	301.80						
B20-7	200	28.1		1.1039	1.6567	220.78	110.56	331.34						
B20-8	200	28.4	26.8	0.4689	1.3257	93.78	171.36	265.14	119.88	164.53	284.41	69.37	38.01	40.43
A00-1	199	23.6		0.0258	0.0445	5.13	3.72	8.86						
A00-2	203	26.9		0.0523	0.0535	10.62	0.24	10.86						
A00-3	202	28.5		0.0324	0.0513	6.54	3.82	10.36						
A00-4	200	30.9	27.5	0.0427	0.0678	8.54	5.02	13.56	7.71	3.20	10.91	2.39	2.06	1.96
A05-1	201	26.7		0.0375	0.0375	7.54	0.00	7.54						
A05-2	201	26.2		0.0339	0.0339	6.81	0.00	6.81						
A05-3	204	28.6		0.0322	0.0322	6.57	0.00	6.57						
A05-4	200	28.6	27.5	0.0470	0.1019	9.40	10.98	20.38	9.40	10.98	20.38	-	-	-
A10-1	202	28.0		0.1106	0.3602	22.34	50.42	72.76						
A10-2	202	27.3		0.1066	0.325	21.53	44.12	65.65						

Probeta	L (mm)	f' <sub>c</sub> (MPa)	f' <sub>c</sub> media MPa	WF <sub>εc</sub> (N·mm/mm <sup>3</sup> )	WF <sub>εu</sub> (N·mm/mm <sup>3</sup> )	GF <sub>εc</sub> N/mm	GF <sub>εu</sub> N/mm	GF <sup>c</sup> N/mm	GF <sub>εc</sub> N/mm	GF <sub>εu</sub> N/mm	GF <sup>c</sup> N/mm	σ <sub>α</sub> N/mm	σ <sub>β</sub> N/mm	σ <sub>c</sub> N/mm
A10-3	201	25.9		0.0948	0.2284	19.05	26.85	45.91						
A10-4	202	23.8	26.3	0.0895	0.2911	18.08	40.72	58.80	20.25	40.53	60.78	2.01	9.96	11.44
A20-1	203	28.0		0.458	1.2404	92.97	158.83	251.80						
A20-2	201	30.8		0.1247	0.4152	25.06	58.39	83.46						
A20-3	202	29.5		0.307	0.9264	62.01	125.12	187.13						
A20-4	201	21.8	27.5	0.0863	0.5156	17.35	86.29	103.64	49.35	107.16	156.51	35.01	43.99	77.78
C00-5	201	49.6		0.2482	0.2557	49.89	1.51	51.40						
C00-6	203	42.6		0.1892	0.1892	38.41	0.00	38.41						
C00-7	202	46.4		0.2257	0.2257	45.59	0.00	45.59						
C00-8	203	46.9		0.2276	0.2361	46.20	1.73	47.93						
C05-T1	199	40.4		0.1774	0.1922	35.30	2.95	38.25						
C05-T2	200	39.3		0.1646	0.1849	32.92	4.06	36.98						
C10-T1	202	36.8		0.1408	0.1474	28.44	1.33	29.77						
C10-T2	201	35.1		0.1388	0.1485	27.90	1.95	29.85						
C20-T1	200	38.0		0.1619	0.1731	32.38	2.24	34.62						
C20-T2	201	36.6	41.2	0.1463	0.1771	29.41	6.19	35.60	36.64	2.20	38.84	8.03	1.86	7.31
C05-5	200	41.0		0.1942	0.3726	38.84	35.68	74.52						
C05-6	200	43.3		0.2109	0.4445	42.18	46.72	88.90						
C05-7	199	36.9		0.1594	0.4369	31.72	55.22	86.94						
C05-8	200	41.7	40.7	0.1853	0.5021	37.06	63.36	100.42	37.45	50.25	87.70	4.37	11.85	10.61
C10-5	203	36.5		0.1562	0.7215	31.71	114.76	146.46						
C10-6	205	33.5		0.1468	0.4536	30.09	62.89	92.99						
C10-7	200	41.1		0.1756	0.5612	35.12	77.12	112.24						
C10-8	201	38.9	37.5	0.1684	0.5331	33.85	73.30	107.15	32.69	82.02	114.71	2.23	22.64	22.68
C20-5	204	38.7		0.2176	0.9317	44.39	145.68	190.07						
C20-6	200	39.1		0.2079	0.7912	41.58	116.66	158.24						
C20-7	201	38.0		0.1822	0.7791	36.62	119.98	156.60						
C20-8	201	39.3	38.8	0.2265	0.9296	45.53	141.32	186.85	42.03	130.91	172.94	3.97	14.71	17.98





Gráfica 8. Energía de fractura en compresión



**Gráfica 9. Energía de fractura en compresión comparación entre series**

En la Tabla 16 se presentan los valores de energía de fractura alcanzados, con sus desviaciones estándar de la muestra y la comparación del valor con las muestras de concreto simple. ( $GF^C/GF^C_0$ )

**Tabla 16. Evaluación de resistencia y energía de fractura en compresión**

Mezcla	$\rho_f$ (%)	$f'_c$ prom MPa	$GF_{sc}$ N/mm	$GF_{eu}$ N/mm	$GF^c$ N/mm	$GF^C/GF^C_0$
B00	0,0	25,4 ± 2,4	19,0	10,5	29,5 ± 5	1,00
B05	0,5	22,6 ± 0,2	17,1	43,7	60,8 ± 16	2,06
B10	1,0	27,7 ± 2,9	24,3	57,6	81,9 ± 6	2,78
B20	2,0	26,8 ± 1,7	119,9	164,5	284,4 ± 40	9,66
A00	0,0	27,5 ± 2,6	7,7	3,2	10,9 ± 2	1,00
A05	0,5	27,5 ± 1,1	9,4	11,0	20,4 ± 2	1,87
A10	1,0	26,3 ± 1,6	20,3	40,5	60,8 ± 11	5,57
A20	2,0	27,5 ± 3,5	49,3	107,2	156,5 ± 78	14,35
C00	0,0	41,2 ± 4,7	36,6	2,2	38,8 ± 7	1,00
C05	0,5	40,7 ± 2,4	37,5	50,2	87,7 ± 11	2,26
C10	1,0	37,5 ± 2,9	32,7	82,0	114,7 ± 23	2,95
C20	2,0	38,8 ± 0,5	42,0	130,9	172,9 ± 18	4,45

## 5 COMPORTAMIENTO EN FLEXIÓN

La fractura del concreto sometido a flexión corresponde al Modo I o de apertura, véase Figura 4 del numeral 1.1. Por la facilidad del montaje y la abundante documentación consultada se puede afirmar que el ensayo de flexión, o tensión flexural, es uno de los ensayos más estudiados y difundidos.

El aporte mecánico al comportamiento en flexión del concreto reforzado con fibras de acero viene dado por el control de apertura de la fisura por “cosido” que otorga a la mezcla ductilidad al posibilitarle deformarse más allá de la carga pico.

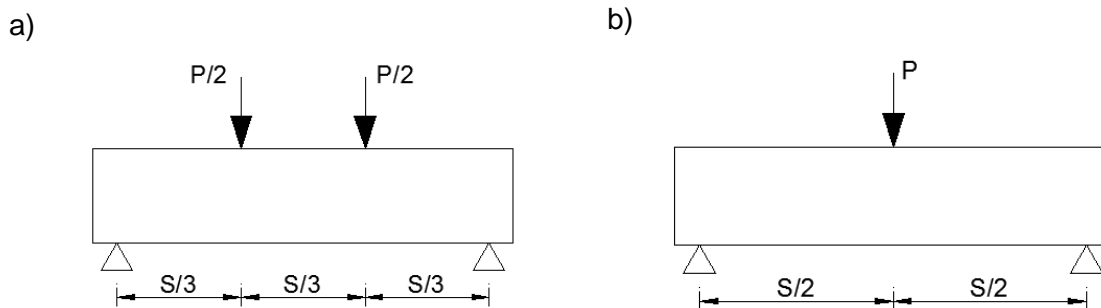
Durante la realización de los ensayos de laboratorio fue evidente el incremento en los tiempos de ensayo sobre las probetas en la medida en que tenían una mayor adición de fibra.

Se evaluará el desempeño a flexión del concreto simple y del reforzado con fibras metálicas mediante:

- Determinación de la resistencia a la flexión expresada como el módulo de rotura del concreto.
- Determinación de la energía de fractura del concreto total y a diferentes deflexiones (2.5 mm, 5 mm y 10mm).

### 5.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO

La resistencia a la flexión en el concreto se estima por medio de ensayos sobre vigas, con los cuales se obtiene el valor del módulo de rotura  $f_R$ . Los montajes usuales para su obtención son ensayos con vigas cargadas en el tercio central o con carga central. Ver Figura 14. Los estándares para ensayo con carga en el tercio central son NTC 2871 (ICONTEC, 2004) o ASTM C78, y para los ensayos con carga central el ASTM C293.(ASTM, 2007)



**Figura 14. Montajes para la obtención del módulo de rotura**

- a) ASTM C78, Ensayo con carga en 3 puntos b) ASTM C293, Ensayo bajo carga en el punto central

Dado que para la obtención de la energía de fractura se utiliza el ensayo de flexión bajo carga central, con muesca, es sobre éste que se determinó el módulo de rotura del concreto, como se ilustra en Figura 16. Véase la ecuación Ec. 5.1

$$f_R = \frac{3}{2} * \frac{P_u * S}{B(D - a_0)^2}$$

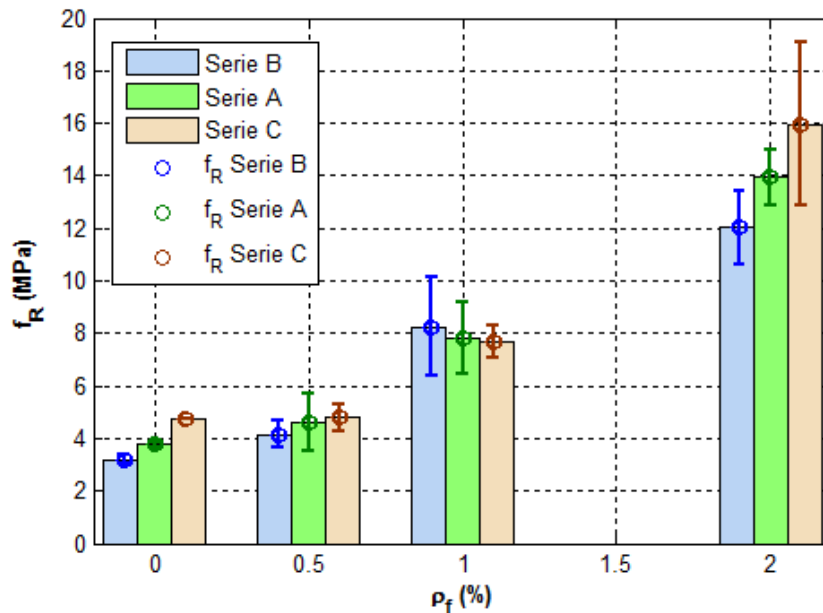
**Ec. 5.1**

Donde  $P_u$  es la máxima carga registrada,  $S$  la luz libre,  $D$  la altura de la viga,  $a_0$  la altura de la muesca, y  $B$  el ancho de la viga.

Se presenta a continuación el cálculo de la resistencia a flexión o módulo de rotura, donde CV corresponde al coeficiente de variación del resultado:

**Tabla 17. Cálculo de la resistencia a flexión**

PROBETA	$P_u$ (kN)	$f_R$ MPa	$f_R$ MPa	CV
B00-1	8,71	3,07		
B00-2	9,47	3,33		
B00-3	nd	nd	3,20 ±0,19	6%
B05-1	13,32	4,69		
B05-2	10,59	3,73		
B05-3	11,51	4,05	4,16 ±0,49	12%
B10-1	19,23	6,77		
B10-2	29,52	10,39		
B10-3	21,53	7,58	8,25 ±1,90	23%
B20-1	36,64	12,90		
B20-2	29,52	10,39		
B20-3	36,32	12,78	12,02 ±1,42	12%
A00-1	nd	nd		
A00-2	10,92	3,84		
A00-3	10,51	3,70	3,77 ±0,10	3%
A05-1	16,55	5,83		
A05-2	12,1	4,26		
A05-3	10,61	3,73	4,61 ±1,09	24%
A10-1	19,42	6,84		
A10-2	25	8,80		
A10-3	nd	nd	7,82 ±1,39	18%
A20-1	40,22	14,16		
A20-2	42,17	14,84		
A20-3	36,32	12,78	13,93 ±1,05	8%
C00-1	13,28	4,67		
C00-2	13,34	4,70		
C00-3	13,71	4,83	4,73 ±0,01	0%
C05-1	15,34	5,40		
C05-2	12,53	4,41		
C05-3	12,96	4,56	4,79 ±0,53	11%
C10-1	23,79	8,37		
C10-2	20,75	7,30		
C10-3	20,89	7,35	7,68 ±0,60	8%
C20-1	55,09	19,39		
C20-2	42,87	15,09		
C20-3	38,07	13,40	15,96 ±3,09	19%



a/c	f'c prom MPa	Mezcla	$\rho_f$ (%)	$f_R$ MPa
0,58	25,40	B00	0,0	3,20 $\pm$ 0,19
		B05	0,5	4,16 $\pm$ 0,49
		B10	1,0	8,25 $\pm$ 1,90
		B20	2,0	12,02 $\pm$ 1,42
0,5	27,50	A00	0,0	3,77 $\pm$ 0,10
		A05	0,5	4,61 $\pm$ 1,09
		A10	1,0	7,82 $\pm$ 1,39
		A20	2,0	13,93 $\pm$ 1,05
0,40	41,20	C00	0,0	4,73 $\pm$ 0,01
		C05	0,5	4,79 $\pm$ 0,53
		C10	1,0	7,68 $\pm$ 0,60
		C20	2,0	15,96 $\pm$ 3,09

**Gráfica 10. Comparación del módulo de rotura entre series**

En la Gráfica 10 se presenta la variación del módulo de rotura entre series, al respecto se puede afirmar:

- En todas las series se incrementa la resistencia a la flexión con la adición de fibras de acero.
- La dispersión del módulo de rotura con respecto al valor medio se incrementa para las altas dosificaciones. (1% y 2%)
- La ganancia en resistencia a la flexión es incipiente hasta 0.5% de adición de fibra, en cambio en dosificaciones altas la resistencia se incrementa casi el doble para el 1% y casi el triple para 2%, en la mezcla de mayor resistencia.

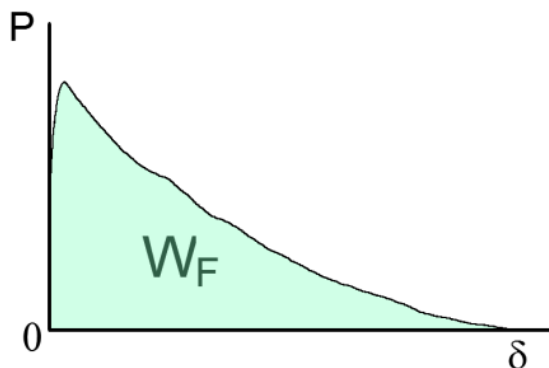
## 5.2 ENERGÍA DE FRACTURA EN FLEXIÓN

(HILLERBORG, 1978) propuso en su trabajo uno de los primeros modelos de fractura del concreto, que se denominó en su momento el método del trabajo de fractura, adoptado posteriormente por el Comité Europeo (RILEM, 2002) bajo la recomendación TC-162.

Dicho modelo utilizaba indistintamente vigas de concreto con o sin muesca, cargadas en el centro de la luz, o con dos cargas puntuales a los tercios de luz. Posteriormente se encontraría con la práctica que las vigas con muesca ofrecían una menor dispersión en los resultados por la inducción de un plano definido de falla.

El modelo de fractura propuesto pasó a denominarse modelo de fisura cohesiva MFC, en el cual se asume la transmisión de tensiones en las caras de la fisura generada después de la falla hasta la rotura total, modificando el comportamiento de la curva carga – deflexión del concreto en el tramo descendente y que se denominará de ahora en adelante “ablandamiento”.

La expresión más general para determinar la energía de fractura mediante MFC, se llama el método del trabajo de fractura o del trabajo total (HILLERBORG, 1978) y consiste en determinar el trabajo de fractura y dividirlo por el área que liga o une las dos caras de la fisura, de esa manera se determina la energía liberada para fracturar una unidad de área, que es la definición de la energía específica de fractura.



$$W_F = \int_0^u P du$$

$$G_F = \frac{W_F}{Alig}$$

Donde Alig, área de zona de liga, equivale para la viga a:

$$Alig = B(D - ao), \text{ ver Figura 16}$$

**Figura 15. Trabajo de fractura en el modelo de fisura cohesiva**  
Adaptada de (SHAH et al., 1995)

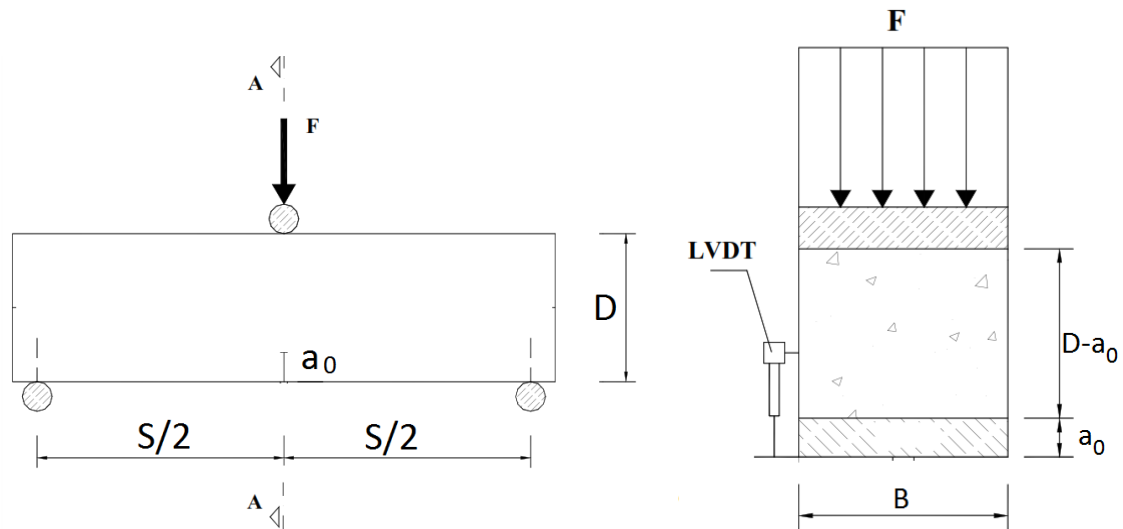


Figura 16. Arreglo general de un montaje a flexión con carga central\*

Tomada de (RILEM, 2002)

Se demostraron sin embargo los siguientes inconvenientes con el ensayo (SHAH et al., 1995):

- Una dependencia de tamaño (size effect) entre el tamaño de las vigas y muescas y los valores de energía de fractura obtenidos. Dicha situación es inadmisibles porque niega el postulado que dice que la energía de fractura es una propiedad específica del material.
- En la práctica se encontró dificultad para llevar a cabo el ensayo de ablandamiento hasta el final del ensayo, dado que en un instante del ensayo la viga se cae por efecto del peso propio, o bien porque se alcanza la máxima deflexión posible de medir con los deformímetros cuando, por ejemplo, se analizan probetas con mezclas fibra reforzadas.
- Parte de la energía de fractura medida es disipada en los apoyos laterales y centrales, por efecto del rozamiento y el aplastamiento, y aunque se utilizan rodillos el efecto prevalece.
- Otras fuentes de disipación de energía se presentan en la masa de la probeta por efecto de propagación macroscópica de fisuras, igualmente se pueden presentar pequeños fenómenos de histéresis en el montaje.

Sobre dichos inconvenientes las investigaciones del llamado grupo de Barcelona (ELICES et al., 1992c) realizaron estimaciones para corregir el trabajo de fractura debido a los trabajos de fractura no medidos, así como a los trabajos de fractura disipados por efecto

\* Ensayo TPBT: three point bending test, o ensayo de flexión en tres apoyos, en Colombia es más conocido como ensayo de flexión con carga central

del montaje. De esa forma la energía específica real de fractura, estimada mediante el modelo de fisura cohesiva a través del trabajo de fractura, viene dada por:

$$GF_I = GF_{medida} - (GF_{his} + GF_{soportes} + GF_{masa}) + GF_{cola} \quad \text{Ec. 5.2}$$

### 5.3 AJUSTES AL TRABAJO DE FRACTURA

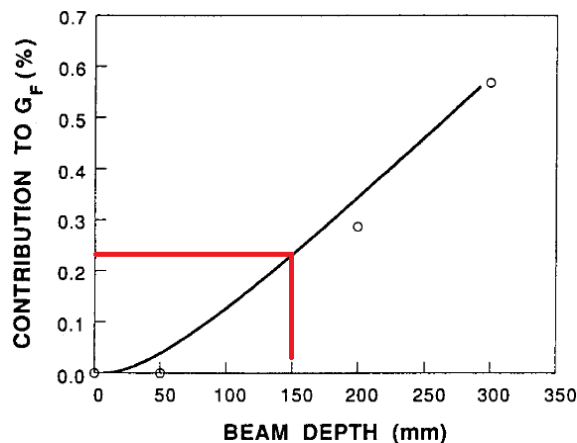
Se presenta a continuación el análisis de las diferentes energías de fractura presentes en el ensayo P -  $\delta$ , las primeras tres porque se miden durante el ensayo y no corresponden a energía liberada en la fractura y la última, el ajuste de cola, porque es una energía de fractura no medida al final del ensayo como se explica más adelante.

**5.3.1 Ajuste por histéresis.** Se presenta disipación de energía durante la realización del ensayo sobre las vigas.(ELICES et al., 1992a), el origen de esa histéresis procede de:

- Disipación mecánica debido a la presencia en el ensayo de elementos inelásticos del montaje, como resortes para compensación de peso propio.
- Histéresis en la máquina de aplicación de la carga o en los instrumentos de medición de la deformación.

La propuesta del investigador (ELICES et al., 1992a) consistió en la determinación de la energía mediante ensayos con otros materiales de propiedades elastoplásticas bien definidas, como por ejemplo vigas de acero. Los valores de energía disipada en la máquina de ese trabajo osciló entre 0% y 0.6% de  $G_F$ , dependiendo la altura de la viga.

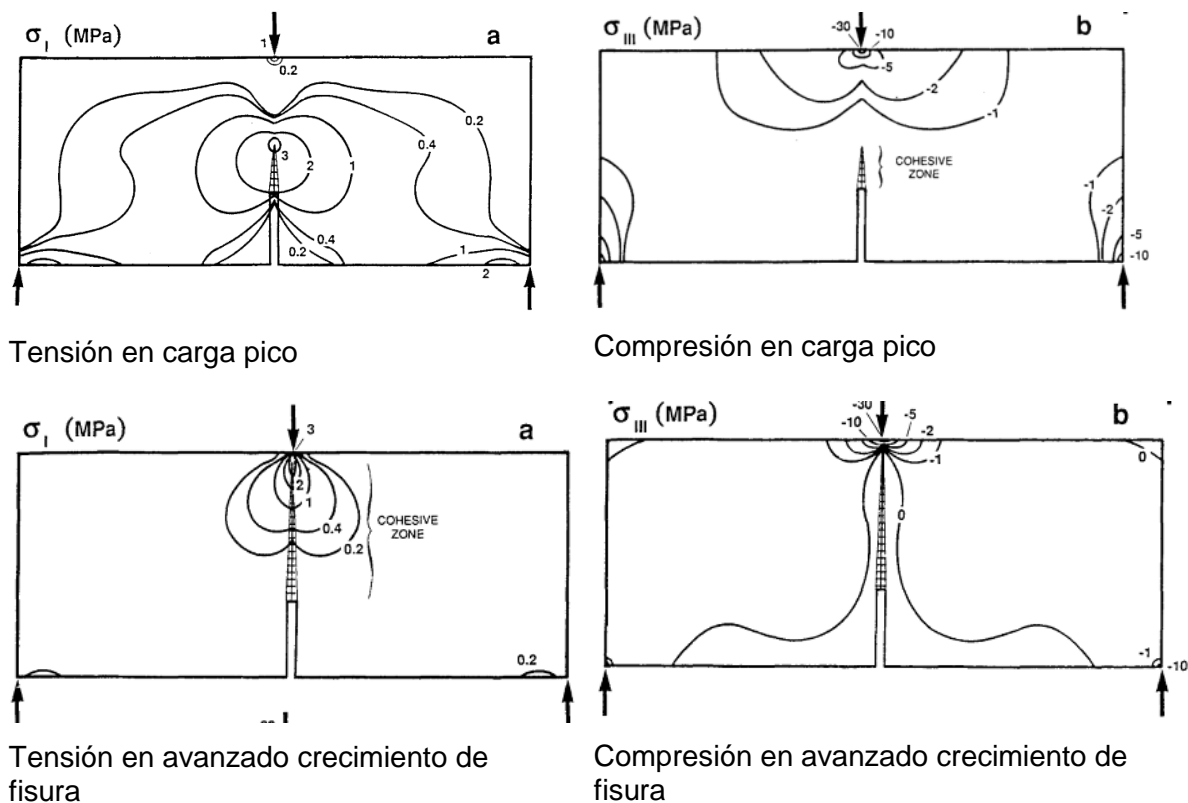
En la Gráfica 11 se estima una energía de 0.22% de la  $G_F$  medida, para la altura de viga 150mm.



**Gráfica 11. Variación de la energía disipada por histéresis**  
Adaptada de (ELICES et al., 1992a)

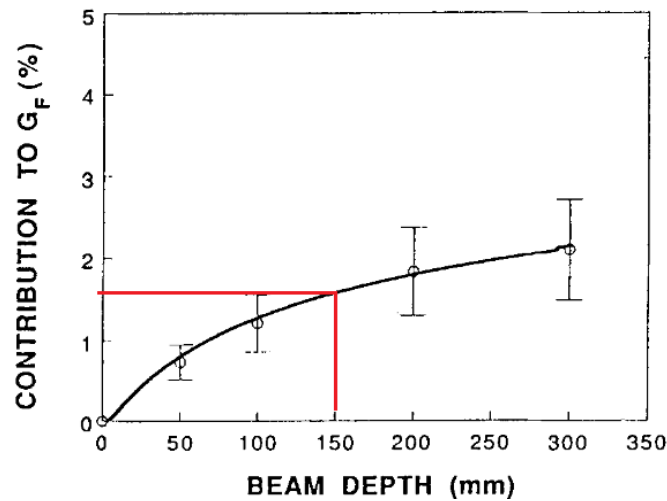


**5.3.2 Ajuste por disipación en la masa.** La energía de fractura medida debería reflejar únicamente la liberada en el proceso de fractura en la fisura o entalla, sin embargo (ELICES et al., 1992b) demostraron mediante la generación de un modelo de elementos finitos la concentración de esfuerzos en la zona de apoyos, tanto laterales como central, y determinó que parte de la energía que se está midiendo corresponde a energía disipada en esas zonas y no al proceso de fractura en el área de ligamento, y por tanto habría que descontarlo. En la Figura 17 se visualizan los estados de esfuerzo con la probeta en la carga pico y cuando ya ha avanzado la fisura al final de la curva P- $\delta$ .



**Figura 17. Esfuerzos principales en la probeta en la carga pico**  
 Adaptada de (ELICES et al., 1992b)

De acuerdo al análisis por elementos finitos realizado por (ELICES et al., 1992b) se tendría, para las vigas de concreto simple de las características de ese trabajo y en el presente caso para una altura de viga de 150 mm, una energía disipada de alrededor de 1.7% de la energía medida en el ensayo.



**Gráfica 12. Variación de la energía disipada en la masa de la probeta**  
Adaptada de (ELICES et al., 1992a)

**5.3.3 Ajuste por disipación en los apoyos.** En los soportes se produce una disipación indeseada de energía (ELICES et al., 1992a) debido principalmente a:

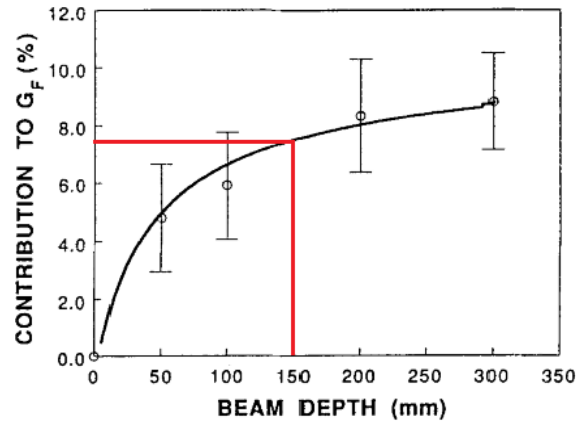
- Daño en el concreto alrededor de los soportes, por ejemplo la disipación por aplastamiento.
- Disipación por fricción entre rodillo y concreto, tanto en los soportes laterales como en el central.

En el presente trabajo no se observó daño alrededor de los soportes, se utilizaron rodillos en los apoyos laterales y un rodillo con rotula en el apoyo central donde se aplica la carga. El uso de rodillos se ajusta a la recomendación por el ensayo del comité técnico RILEM TC-162 (RILEM, 2002).

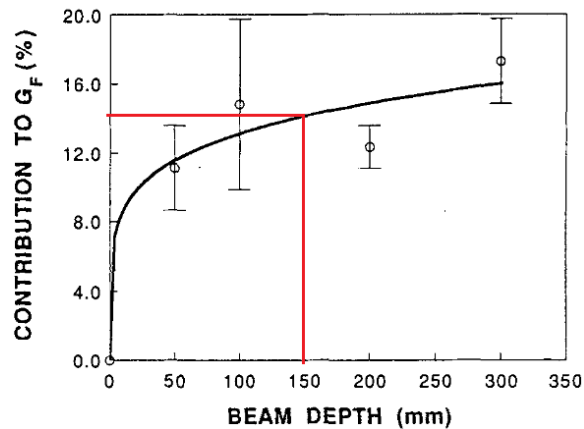
De acuerdo a la Gráfica 13a. se estima un 7.5% de  $G_F$  y en la Gráfica 13b. un 14% de  $G_F$  la energía disipada en los soportes laterales y centrales respectivamente, sobre un valor referencia en ese trabajo de  $G_F=81$  N/m.

Dichos valores no pueden aplicarse directamente en el presente trabajo ya que son específicos de los soportes utilizados, en el documento de referencia (ELICES et al., 1992a) se indica el procedimiento para determinarlo experimentalmente y puede hacer parte de un trabajo posterior.

a. Apoyo central



b. Rodillos laterales



**Gráfica 13. Variación de la energía disipada en los apoyos**  
Adaptada de (ELICES et al., 1992a)

En ausencia de datos se puede estimar en un 5% la disipación de energía en los apoyos, ya que se cumplieron las recomendaciones del RILEM TC-162 (RILEM, 2002) en cuanto al tipo de apoyos indicados para el ensayo y que minimizan el efecto.

En resumen, los valores de energía de fractura a ajustar para la altura de viga de 150mm son:

$$\begin{aligned} \Delta G_F \text{ histéresis:} & 0.22\% G_{F0} \\ \Delta G_F \text{ masa:} & 1.70\% G_{F0} \\ \Delta G_F \text{ soportes:} & 5.00\% G_{F0} \end{aligned}$$

No se aplicó ninguna de las correcciones por las siguientes consideraciones:

- No se cuenta con evidencia de histéresis en la máquina de ensayos, ni por el montaje ni por la velocidad de aplicación de la carga, la cual se realizó con la mínima posible 0.5 mm/min.

- Se utilizaron rodillos en los apoyos laterales y una rótula para la aplicación de la carga central. No se produjo daño en los apoyos que evidenciará disipación de energía.
- Los valores de disipación en la masa de la probeta provienen de una estimación sobre probetas sin fibra. Se recomendará para futuras investigaciones realizar los modelos de elementos finitos que permitan establecer la magnitud de esos descuentos de energía.

**5.3.4 Ajuste de Cola Lejana.** El ensayo a flexión en vigas sobre tres apoyos RILEM TC-162 (RILEM, 2002) tiene que desarrollarse teóricamente hasta ablandar completamente la muestra, es decir hasta  $P=0$ , con lo cual se podrá determinar completamente el trabajo de fractura como el área bajo la curva  $P - \delta$ .

En la práctica no es posible realizarlo por varias razones:

- Cuando la carga post pico desciende y tiende a cero y el valor se aproxima a una carga equivalente  $P_{eq}$ , la cual es aproximadamente la suma de la masa de la probeta más el montaje, la muestra sufre una inestabilidad y se rompe bajo su propio peso, quedando sin registrar dicha parte de la energía, ya que se libera de golpe.
- En el caso de las muestras de concreto con fibra de acero, la carga desciende asintóticamente y los valores de deflexión, flecha o la apertura de la fisura  $CMOD$ , se extienden más allá del alcance del equipo de medición, lo cual en efecto ocurrió en el presente trabajo.
- En las muestras fibra reforzadas, como las utilizadas en el presente trabajo, la duración del ensayo se puede prolongar por más de 2 horas, lo cual puede ser indeseable pues los ensayos de caracterización de fractura requieren varias muestras por cada mezcla y es deseable fallarlas el mismo día. La recomendación RILEM TC-162 (RILEM, 2002) indica realizar series de 6 probetas por mezcla, en el presente trabajo se realizaron series de 3 probetas para dar alcance al análisis de otros fenómenos, por lo cual se recomendará realizar más vigas a flexión para disminuir la dispersión.

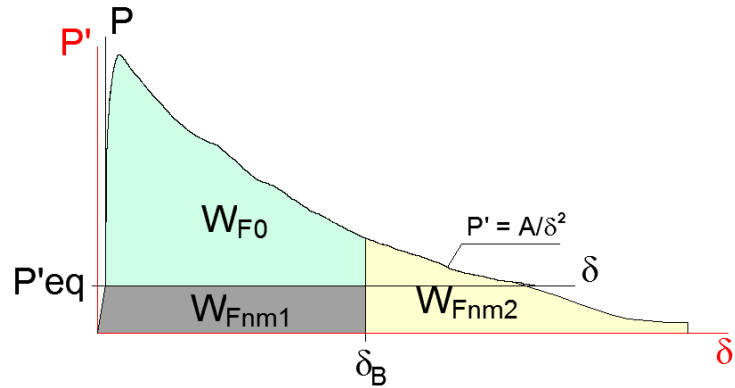
En los trabajos de (ELICES et al., 1992c, BAŽANT y PLANAS, 1998, CIFUENTES, 2010) se presenta la deducción del ajuste de cola lejana. El método propuesto a utilizar en el presente trabajo recoge lo desarrollado por dichos autores y se describe a continuación.

En la Figura 18 se presenta la curva de respuesta  $P-\delta$  interrumpida en la flecha  $\delta_B$  por alguno de los motivos mencionados anteriormente. Claramente se distinguen 3 trabajos de fractura  $W_{F0}$  que es el trabajo medido por los deformímetros y la celda de carga de la máquina de ensayos, un  $WF_{nm1}$  que representa el trabajo de fractura efectuado por la carga equivalente  $P_{eq}$  que involucra el peso propio de la muestra y del montaje que se apoye sobre la viga y por último el trabajo  $WF_{nm2}$  equivalente al ajuste de cola lejano.

El trabajo total de fractura, requerido para calcular la energía de fractura, viene dado por:

$$WF = \int_0^{\delta u} P d\delta \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$WF = WF_{nm1} + WF_0 + WF_{nm2} \quad \text{Ec. 5.4}$$



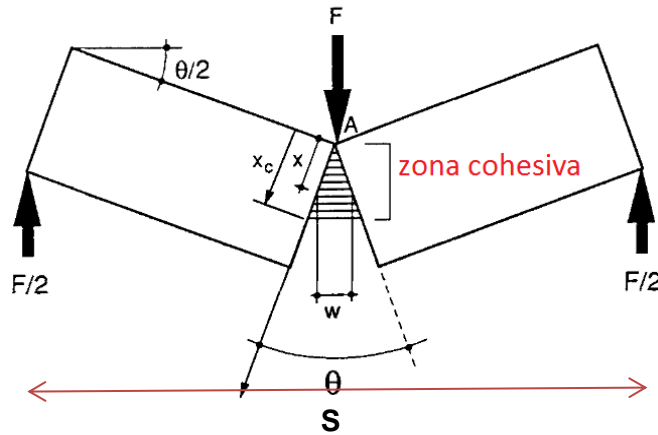
**Figura 18. Curva P-δ de un ensayo a flexión interrumpido en δB**  
Adaptada de (CIFUENTES, 2010)

El trabajo  $WF_{nm1}$  equivale a la acción de  $m_1+m_2$  sobre la muestra, donde  $m_1$  es la masa de la muestra entre los apoyos y  $m_2$  la masa del montaje que se apoya directamente sobre la viga,  $WF_{nm1}$  es el trabajo de fractura realizado por la carga equivalente y se expresa como:

$$WF_{nm1} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g \cdot \delta_B}{2} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\delta_B$  la última deflexión registrada.

$WF_{nm2}$  es el trabajo producido por el ajuste de cola lejana. (ELICES et al., 1992c) propusieron la obtención de una función de la cola experimental, para lo cual se utilizó el modelo de bloques rígidos de (PETTERSSON, 1981) que considera dos bloques rígidos unidos por una rótula en la parte superior de la entalla y una función llamada de ablandamiento  $\sigma(w)$ , relacionada con la apertura de fisura actuando sobre las caras adyacentes de la fisura. Ver Figura 19.



**Figura 19. Modelo de Bloques Rígidos**

Tomada de (PETTERSSON, 1981)

El equilibrio de momentos en la sección central viene dado por:

$$P = \frac{4}{S} \int_0^{x_c} \sigma(w) Bx dx \quad \text{Ec. 5.6}$$

Siendo B el ancho de la viga, las relaciones entre giro de probeta ( $\theta$ ), apertura de fisura ( $w$ ) y flecha ( $\delta$ ) son:

$$w \approx \theta \cdot x \rightarrow dw \approx \theta dx$$

$$\delta = \frac{\theta S}{4}$$

La carga (P) y la flecha ( $\delta$ ) se relacionan como:

$$P = \frac{BS \int_0^{w_c} \sigma(w) w dw}{4\delta^2} = \frac{BSM_1}{4\delta^2} \quad \text{Ec. 5.7}$$

Siendo  $M_1$  el momento estático del área encerrada por la curva  $\sigma - w$  con respecto al eje de ordenadas. En la práctica no es necesario determinar  $M_1$ , pues basta con analizar el valor de la flecha entre dos puntos determinados de la curva de ablandamiento.

El trabajo no medido en la cola del ensayo, ver Figura 18, es:

$$WFnm2 = \int_{\delta_B}^{\infty} P' d\delta' \quad \text{Ec. 5.8}$$

Donde  $P'$  puede reemplazarse por:

$$P' = \frac{BSM_1}{4\delta'^2} = A \left( \frac{1}{\delta'^2} - \frac{1}{\delta_B^2} \right)$$

A es el denominado factor de ajuste de cola lejana, expresado en  $[F \cdot L^2]$ , entonces el trabajo no medido  $WF_{nm2}$  viene dado por:

$$WF_{nm2} = \int_{\delta_B}^{\infty} A \left( \frac{1}{\delta'^2} - \frac{1}{\delta_B^2} \right) d\delta' = \frac{A}{\delta_B} \quad \text{Ec. 5.9}$$

Con el trabajo de fractura medido en el laboratorio y las ecuaciones Ec. 5.5 y Ec. 5.9 tendremos que el trabajo total de fractura viene dado por:

$$WF = \frac{(m1 + m2) \cdot g \cdot \delta_B}{2} + WF_0 + \frac{A}{\delta_B} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Las unidades de cada uno de los tres términos es  $[F \cdot L]$ , y se presentan en la Tabla 20 así como el aporte de cada uno de ellos al valor total del trabajo de fractura. En el ANEXO D se presentan las gráficas con el ajuste por mínimos cuadrados para la determinación del ajuste de cola lejana.

La energía de fractura debida al trabajo de fractura sobre la fisura vendrá dado por:

$$GF = \frac{WF}{Alig} = \frac{WF}{B(D - a_0)} \quad \text{Ec. 5.11}$$

Donde  $Alig$ , es el área de liga  $B(D - a_0)$ .

Finalmente, la energía de concreto en modo I, estimada por medio del modelo de fisura cohesiva y el método del trabajo RILEM, vendrá dada por:

$$GF_I = GF - (GF \text{ histerisis} + GF \text{ soportes} + GF \text{ masa}) \quad \text{Ec. 5.12}$$

#### 5.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se elaboraron (36) probetas prismáticas de 150 mm x 150 mm con una luz de 600 mm, (3) por cada una de las (12) mezclas de concreto. La totalidad de las vigas se prepararon los días sábado, se desencofraron los lunes a primera hora y se sumergieron en la piscina de curado durante 28 días. 2 o 3 días antes de la fecha de ensayo se extraían de la piscina y se realizaba la entalla, o muesca y se sumergían nuevamente hasta el inicio de la jornada de ensayos. Ver Fotografía 4. La entalla se realizó con sierra húmeda, con un ancho de entre 2 mm y máximo 5 mm y una profundidad  $a_0$  de 25 mm, dicha profundidad no es arbitraria, debe cumplir una relación con respecto a la altura o canto de la viga y fue prefijada para el ensayo de concreto fibroreforzado con fibras no mayores a 62 mm de largo, y con tamaño máximo de agregado menor a 32 mm, ambas condiciones se cumplen, por tanto la configuración del ensayo es apropiada y cumple con las recomendaciones (RILEM, 2002) para el ensayo a flexión.

En la Figura 20 se ilustra el montaje utilizado en el presente trabajo, nótese que se utilizaron 2 deformímetros digitales LVDT en ambas caras de la viga para validar la medición de la flecha y en caso de que uno de ellos se saliera de la placa bajo la viga, como en efecto ocurrió en un par de ensayos.



Fotografía 4. Realización de fisura inducida

La ejecución de las ranuras se realizó de manera manual no encontrándose inconveniente para alcanzar las dimensiones exigidas por la recomendación (RILEM, 2002).

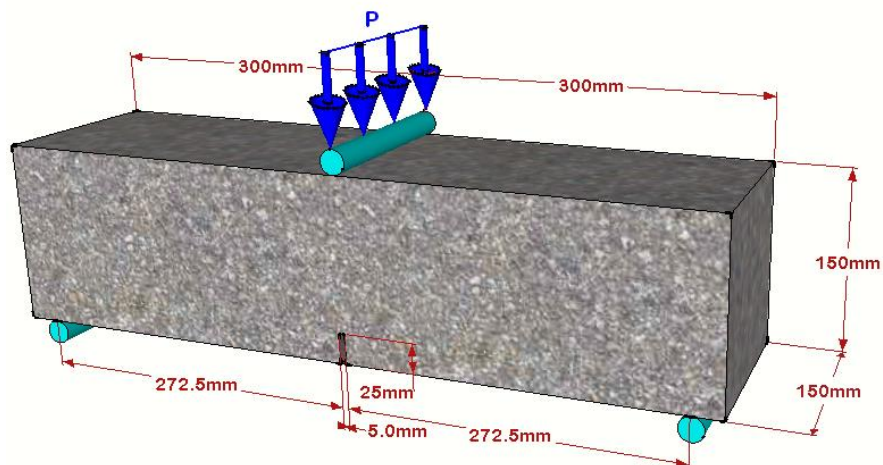
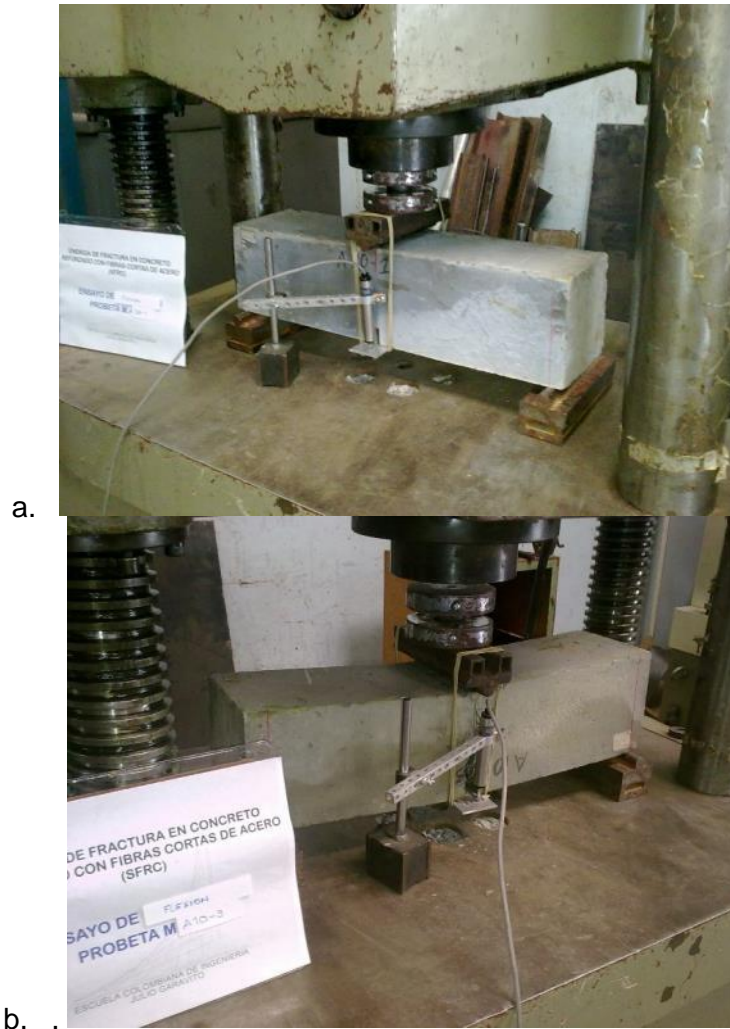


Figura 20. Montaje del ensayo a flexión utilizado



En la Fotografía 5 se visualizan dos estados del ensayo a flexión al inicio y cuando la flecha central y la apertura de fisura han crecido por encima de la carga última de falla, en la parte final del ensayo.



**Fotografía 5. Ensayo de flexión en viguetas**

a. Inicio del ensayo, b. Deflexión alcanzada

En la Tabla 25 se presenta el registro de las probetas realizadas por cada una de las muestras, así como la edad alcanzada al momento de la rotura.

**Tabla 18. Probetas ensayadas a flexión**

Serie	Vigas	Elabora	Ensayo	Edad (d)	Serie	Vigas	Elabora	Ensayo	Edad (d)
M.A00	3	12-may-12	9-jun-12	28	M.B10	3	16-jun-12	14-jul-12	28
M.A05	3	12-may-12	9-jun-12	28	M.B20	3	16-jun-12	14-jul-12	28
M.A10	3	26-may-12	23-jun-12	28	M.C00	3	07-jul-12	04-ago-12	28
M.A20	3	26-may-12	23-jun-12	28	M.C05	3	07-jul-12	04-ago-12	28
M.B00	3	02-jun-12	30-jun-12	28	M.C10	3	28-jul-12	25-ago-12	28
M.B05	3	02-jun-12	30-jun-12	28	M.C20	3	28-jul-12	25-ago-12	28



**Fotografía 6. Estado del espécimen al final del ensayo**

Los ensayos se realizaron en la máquina Universal Shimadzu del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se aplicó la compresión con la celda de carga a una tasa de 0.5 mm/min durante la totalidad del ensayo, hasta cuando el ensayo se detiene por rotura completa de la probeta, esto último en el caso de las probetas sin fibra, o hasta que se alcanza una deflexión considerable, cercana al final de la carrera del deformímetro, con un comportamiento asintótico en la curva carga - flecha. Cabe recordar que se limitó en muchos casos por el tiempo del ensayo. En la Tabla 19 se presenta la duración de los ensayos.

Durante el ensayo se toman lecturas con deformímetros lvdts de 1 pulgada de carrera y precisión de centésimas de milímetro, los datos son capturados con el programa de adquisición de datos LabView a una tasa de 5 datos por segundo, por lo cual se deberá realizar a concatenación de datos explicada en el ANEXO C.

Las lecturas de los deformímetros se suavizan y promedian para obtener la flecha en el centro de la probeta. En la mayoría de ensayos la fisura se produjo en el centro y en unas pocas se presentó más de una fisura.

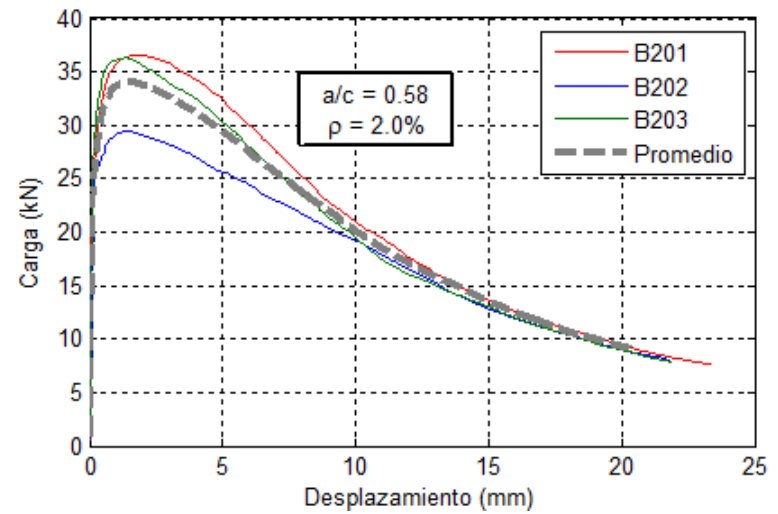
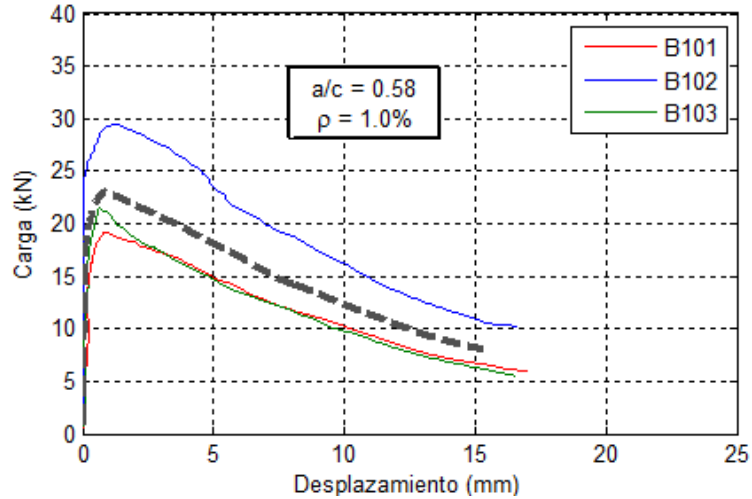
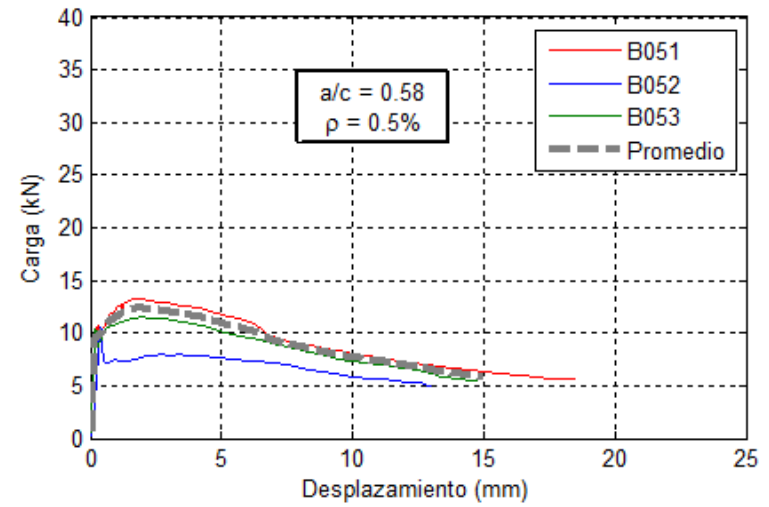
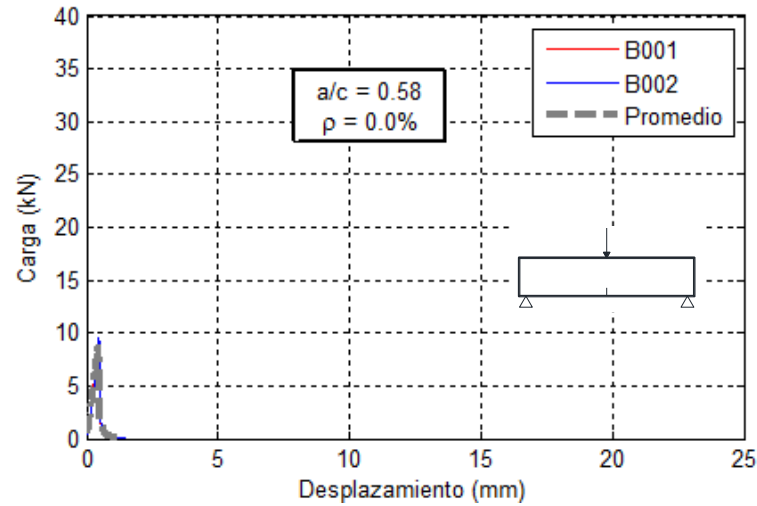
**Tabla 19. Duración de los ensayos a flexión**

Muestra	Duración (min)	Muestra	Duración (min)	Muestra	Duración (min)
A00-1	nd	B00-1	3.13	C00-1	2.77
A00-2	2.13	B00-2	2.43	C00-2	2.30
A00-3	0.93	B00-3	nd	C00-3	1.83
A05-1	38.13	B05-1	19.50	C05-1	20.63
A05-2	36.93	B05-2	15.57	C05-2	17.37
A05-3	35.07	B05-3	15.63	C05-3	18.20
A10-1	17.70	B10-1	9.80	C10-1	28.13
A10-2	22.57	B10-2	20.47	C10-2	19.00
A10-3	nd	B10-3	18.50	C10-3	26.83
A20-1	25.8	B20-1	29.63	C20-1	36.00
A20-2	26.8	B20-2	24.20	C20-2	30.10
A20-3	24.3	B20-3	24.33	C20-3	27.67

En los numerales 5.4.1 a 5.4.3 se presentan los resultados de las curvas P- $\delta$ .

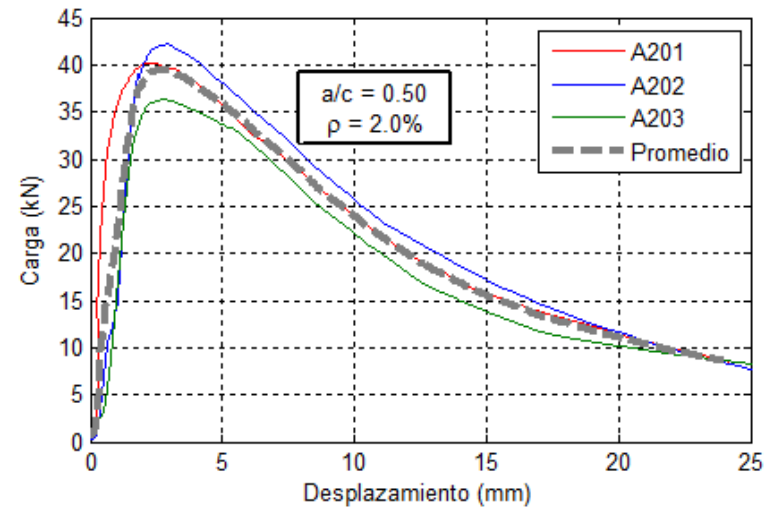
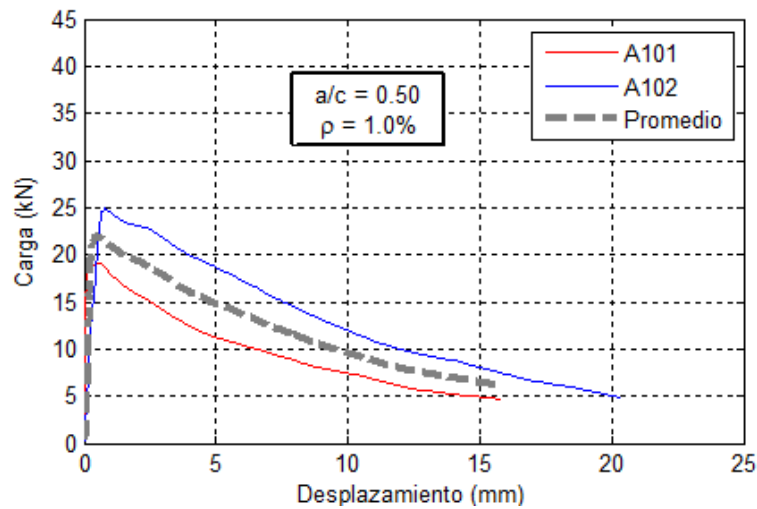
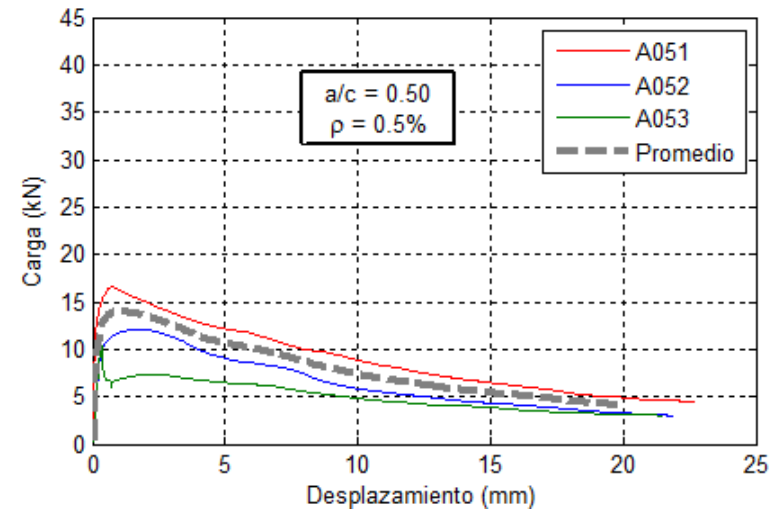
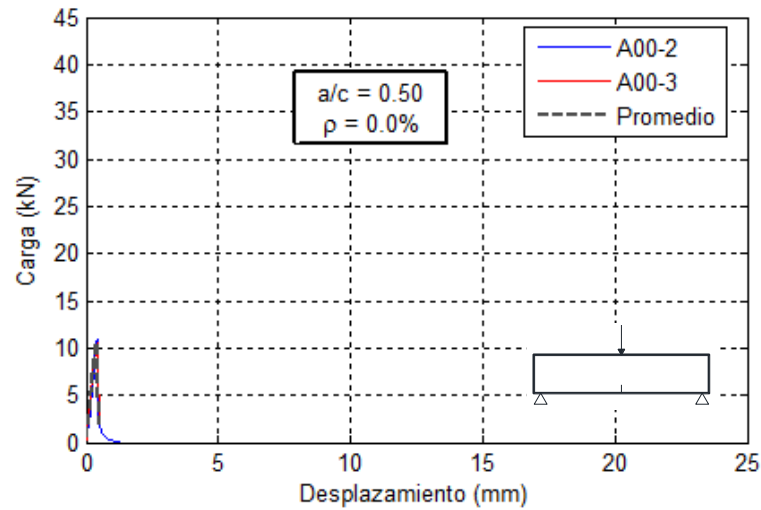
Se observó cómo para las mezclas de mayor tenacidad ej. C20 se presentan saltos en la curva, los cuales venían acompañados de un sonido de ruptura y corresponden con la rotura de las fibras de acero presentes en la fisura.

### 5.4.1 Serie B



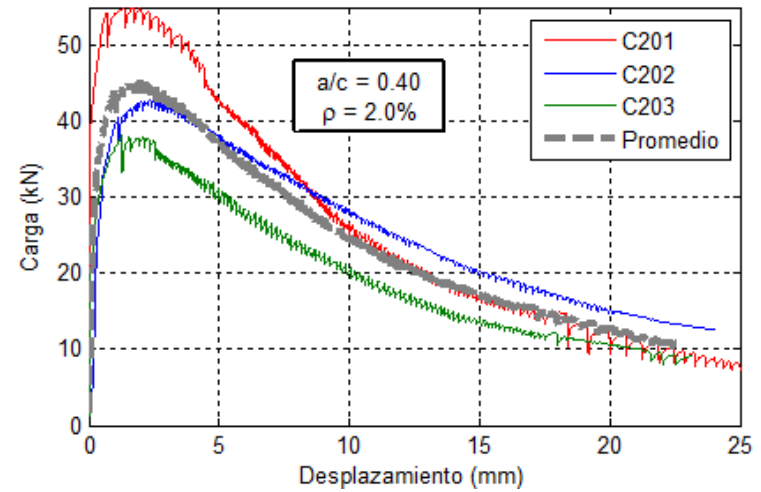
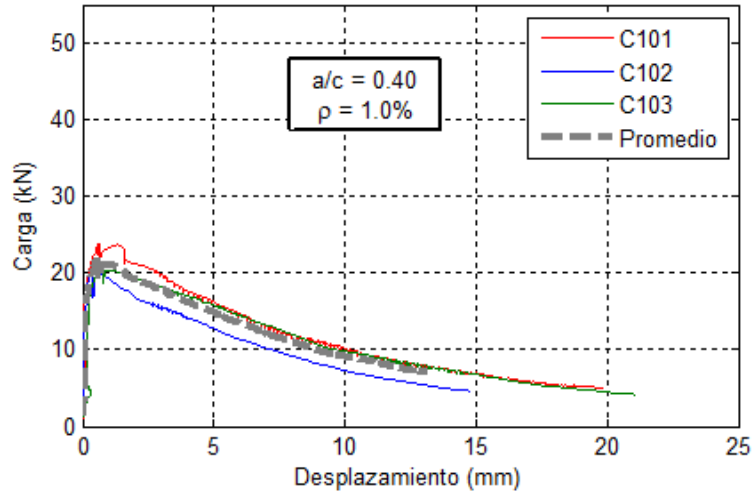
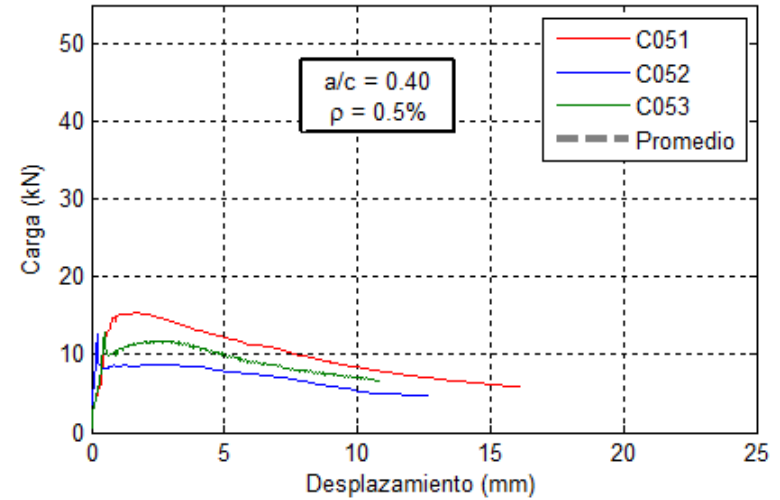
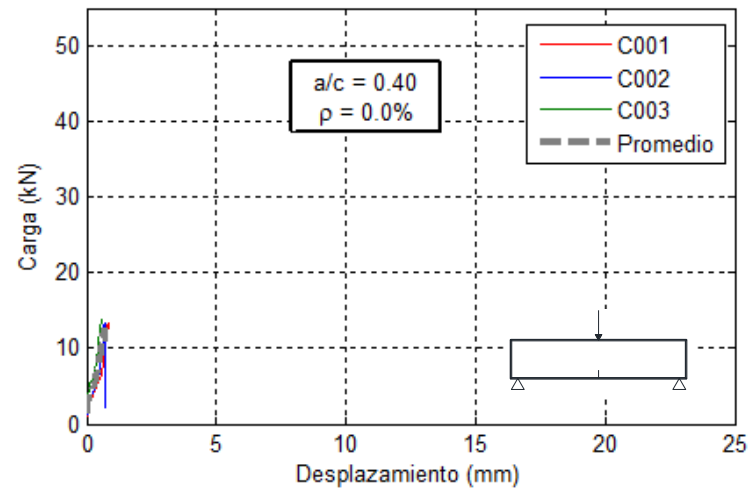
Gráfica 14. Comportamiento en flexión de las probetas Serie B

### 5.4.2 Serie A



Gráfica 15. Comportamiento en flexión de las probetas Serie A

### 5.4.3 Serie C



Gráfica 16. Comportamiento en flexión de las probetas Serie C

**Tabla 20. Calculo de la energía de fractura Modo I para flexión**

#	m1+m2 (Kg)	mg/2 (kN)	dmax mm	Pmax kN	WF <sub>0</sub> kN·mm	A kN·mm <sup>2</sup>	mgdu/2 kN·mm	A/du kN·mm	WFt kN·mm	GFPmax N/mm	GF2.5 N/mm	GF5 N/mm	GF10 N/mm	GFt N/mm
A00-1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
A00-2	34.28	0.17	0.52	10.92	3.04	0.4733	0.087	0.915	4.0421	0.119	nd	nd	nd	0.216
A00-3	34.28	0.17	0.50	10.51	3.08	0.4837	0.085	0.960	4.1244	0.143	nd	nd	nd	0.220
A05-1	34.82	0.17	22.66	16.55	201.62	863.87	3.869	38.123	243.6121	0.614	2.028	3.807	6.662	12.993
A05-2	34.82	0.17	21.84	12.10	141.00	703.98	3.729	32.234	176.9625	0.893	1.468	2.878	4.950	9.438
A05-3	34.82	0.17	21.43	10.61	106.20	350.100	3.659	16.337	126.1959	0.107	0.944	1.885	3.464	6.730
A10-1	35.36	0.17	15.74	19.42	154.86	459.08	2.729	29.166	186.7556	0.136	2.307	4.061	6.570	9.960
A10-2	35.36	0.17	20.29	25.00	263.06	2,373.0	3.518	116.954	383.5322	0.708	2.833	5.597	9.702	20.455
A10-3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
A20-1	36.15	0.18	24.04	40.22	529.57	4,467.8	4.261	185.849	719.6791	3.964	4.379	9.511	17.445	38.383
A20-2	36.15	0.18	26.08	42.17	551.53	4,214.7	4.622	161.607	717.7587	4.137	3.082	8.533	17.093	38.280
A20-3	36.15	0.18	26.75	36.32	485.72	2,162.9	4.741	80.856	571.3169	3.374	2.740	7.481	15.029	30.470
B00-1	35.26	0.17	1.41	8.71	2.57	0.2983	0.244	0.212	3.0253	0.104	nd	nd	nd	0.161
B00-2	35.26	0.17	1.45	9.47	2.72	0.2923	0.251	0.202	3.1717	0.108	nd	nd	nd	0.169
B00-3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
B05-1	35.61	0.17	18.45	13.32	164.99	547.260	3.221	29.662	197.8728	1.136	1.586	3.274	5.897	10.553
B05-2	35.61	0.17	12.96	10.59	88.04	240.150	2.263	18.530	108.8326	0.110	0.975	2.044	3.922	5.804
B05-3	35.61	0.17	14.71	11.51	127.55	425.690	2.568	28.939	159.0569	1.142	1.426	2.907	5.280	8.483
B10-1	36.03	0.18	17.00	19.23	199.95	720.000	3.003	42.353	245.3057	0.779	2.296	4.516	7.876	13.083
B10-2	36.03	0.18	16.54	29.52	319.11	451.320	2.921	27.287	349.3180	2.031	3.915	7.445	12.695	18.630
B10-3	36.03	0.18	16.49	21.53	196.70	1,028.90	2.913	62.395	262.0080	0.531	2.513	4.714	8.002	13.974
B20-1	36.77	0.18	23.37	36.64	474.97	2,429.0	4.213	103.937	583.1196	3.271	4.548	9.187	16.304	31.100
B20-2	36.77	0.18	21.79	29.52	398.12	2,235.2	3.928	102.579	504.6273	2.087	3.689	7.351	13.376	26.913
B20-3	36.77	0.18	21.83	36.32	439.68	2,617.2	3.935	119.890	563.5054	2.441	4.575	8.972	15.625	30.054
C00-1	35.46	0.17	0.85	13.28	5.26	-	0.148	-	5.4081	0.273	nd	nd	nd	0.288

#	m1+m2 (Kg)	mg/2 (kN)	dmax mm	Pmax kN	WF <sub>0</sub> kN·mm	A kN·mm <sup>2</sup>	mgdu/2 kN·mm	A/du kN·mm	WFt kN·mm	GFPmax N/mm	GF2.5 N/mm	GF5 N/mm	GF10 N/mm	Gf <sub>t</sub> N/mm
C00-2	35.46	0.17	0.72	13.34	4.30	-	0.125	-	4.4252	0.225	nd	nd	nd	0.236
C00-3	35.46	0.17	0.57	13.71	4.32	-	0.099	-	4.4191	0.236	nd	nd	nd	0.236
C05-1	35.82	0.18	15.91	15.34	159.04	586.84	2.794	36.885	198.7194	1.199	1.831	3.634	6.387	10.598
C05-2	35.82	0.18	12.61	12.53	88.88	161.16	2.215	12.780	103.8751	0.052	1.142	2.287	4.144	5.540
C05-3	35.82	0.18	10.68	12.96	99.33	263.07	1.876	24.632	125.8378	0.133	1.406	2.895	5.142	6.711
C10-1	36.19	0.18	19.82	23.79	232.21	702.01	3.517	35.419	271.1458	0.643	2.887	5.351	8.793	14.461
C10-2	36.19	0.18	14.76	20.75	157.61	532.03	2.619	36.045	196.2742	0.334	2.400	4.366	7.026	10.468
C10-3	36.19	0.18	21.05	20.89	224.83	1,179.80	3.735	56.048	284.6123	0.603	2.438	4.771	9.252	15.179
C20-1	36.92	0.18	26.36	55.09	653.92	1,894.6	4.771	71.874	730.5652	4.675	6.920	13.468	22.652	38.963
C20-2	36.92	0.18	24.00	42.87	615.85	3,163.4	4.344	131.808	752.0023	4.429	4.728	10.143	18.940	40.107
C20-3	36.92	0.18	23.15	38.07	465.55	2,676.3	4.190	115.607	585.3470	2.125	4.588	9.045	15.732	31.219



## 5.5 ENERGÍA TOTAL DE FRACTURA EN FLEXIÓN

A partir del programa experimental se obtuvieron curvas carga – flecha, cuyo ensayo se ejecutó de acuerdo a las recomendaciones del Comité Europeo RILEM TC-162, los datos del ensayo se adquirieron a través de (2) equipos diferentes, así:

- Equipo de Pruebas (UNIVERSAL) con capacidad máxima de 100 Ton, conectado equipo colector de datos. Se aplicó la carga de manera constante y controlada a la tasa mínima de la máquina de 0.5 mm/min. Los datos recopilados en intervalos de 2 seg. se analizan como se indica en el Apéndice A.
- Colector de datos Labview de deformímetros digitales (LVDT) con una carrera máxima de 25 mm, y una precisión intrínseca de 0.001 mm. La compaginación de las medidas entre los equipos de medición se realizó conforme lo descrito en el Apéndice A del presente trabajo.

Utilizando el modelo de fisura cohesiva, en particular el método de trabajo de fractura con corrección de ajuste de cola, conforme el procedimiento (ELICES et al., 1992c) y en particular para el caso de los concretos fibro reforzados la aplicación realizada por (CIFUENTES, 2010).

La energía de fractura, independiente de tamaño, se obtiene a partir de:

$$G_F = \frac{W_{FT}}{Alig} \quad \text{Ec. 5.13}$$

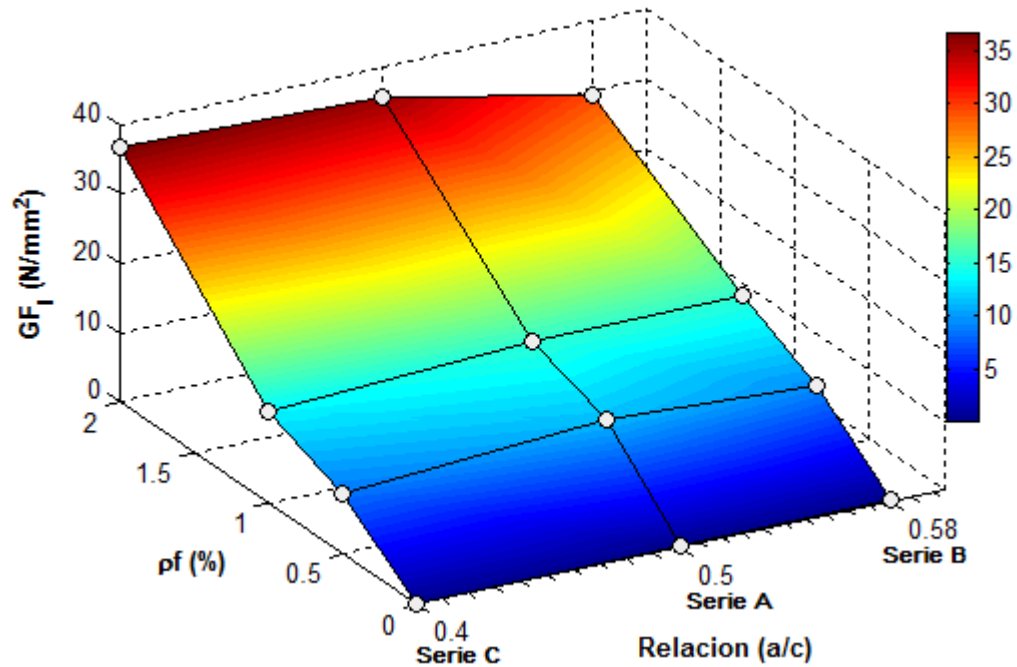
Dónde:

$$W_{FT} = W_{FO} + P'eq * \delta'_u + \frac{A}{\delta'_u} \quad y \quad Alig = B(d - a_0)$$

$W_{FT}$  es trabajo total de fractura,  $W_{FO}$  es el área bajo la curva esfuerzo deformación medida hasta la deflexión última  $\delta'_u$ ,  $P'eq$  es la fuerza equivalente al peso propio del espécimen entre apoyos considerado aplicado en el centro de luz,  $A$  es el parámetro de ajuste de cola,  $B$  es el ancho de la viga,  $d$  la altura de la viga y  $a_0$  la altura de la muesca o entalla.

La energía de fractura total  $G_F$  obtenida a partir del método del trabajo de fractura, incluido el ajuste de cola lejana para todas las muestras, se presenta en la Tabla 20.

Se presenta la comparación de las energías de fractura y su comparación con las muestras de concreto simple:



a/c	f'c prom MPa	Serie	$\rho_f$ (%)	$G_{F_I}$ N/mm	$G_F/G_{F0}$	Variación f'c anterior
0,58	25,4	B00	0,0	0,165 ±0,006	1	-
		B05	0,5	9,518 ±1,464	58	-
		B10	1,0	15,229 ±2,979	92	-
		B20	2,0	29,356 ±2,179	178	-
0,50	27,5	A00	0,0	0,218 ±0,003	1	32%
		A05	0,5	11,215 ±2,514	51	18%
		A10	1,0	15,208 ±7,421	70	0%
		A20	2,0	35,711 ±4,539	164	22%
0,40	41,2	C00	0,0	0,253 ±0,03	1	16%
		C05	0,5	8,655 ±2,749	34	-23%
		C10	1,0	13,369 ±2,538	53	-12%
		C20	2,0	36,763 ±4,836	145	3%

**Gráfica 17. Energía de Fractura total Modo I en flexión comparación entre series**

En la Gráfica 17 se presenta la variación de energía de fractura entre series, al respecto se puede afirmar:

- En todas las series se incrementa la energía de fractura con la adición de fibras de acero.

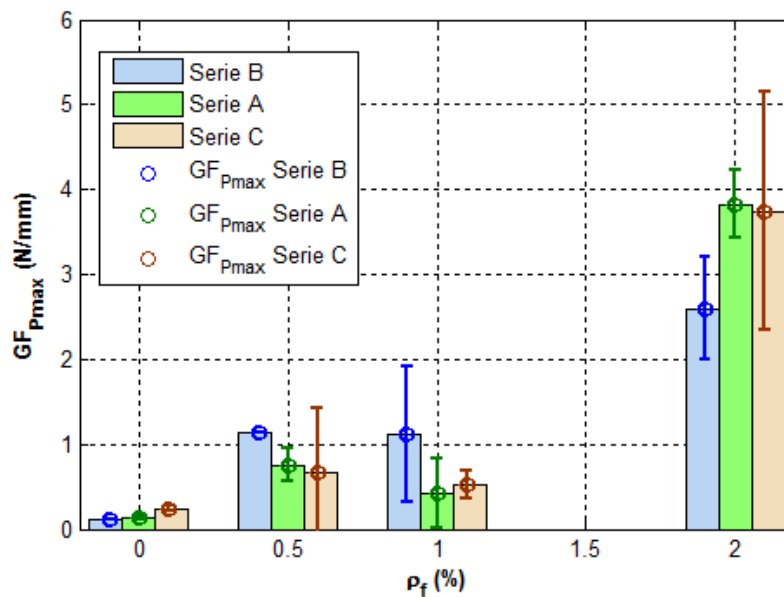
- Los mayores incrementos se observaron en la mezcla con baja resistencia.
- Al aumentar la resistencia de la mezcla ésta empieza a tornarse frágil y la adición de fibras no reporta la misma mejora en ductilidad. La columna variación  $f'c$  anterior compara contra la mezcla de igual cuantía, y se observa que entre las mezclas B y A hay incrementos entre el 18 y 32% de tenacidad, mientras que entre B y C hay pérdidas de tenacidad de hasta el 23%, en ambos casos con el doble de adición de fibra con respecto a la mezcla anterior.

A continuación se realiza la valoración de la energía de fractura hasta la carga máxima ( $P_{max}$ ) y hasta las deflexiones 2.5 mm, 5 mm y 10 mm. Cuando esas deflexiones no se alcanzaron en alguna de las mezclas la comparación se realiza con la última deflexión medida.

Las muestras B05-2, A05-3 y C05-2 resaltadas en amarillo no son tenidas en cuenta para el promedio, debido a que la maquina Universal empezó a cargarlas prematuramente mientras se estaba montando la instrumentación, obteniendo valores bajos que no representan el verdadero comportamiento.

**Tabla 21. Energía de fractura en flexión hasta Pmax**

	$G_F$ Pmax N/mm	$G_F$ Pmax N/mm	$\sigma$	CV		$G_F$ Pmax N/mm	$G_F$ Pmax N/mm	$\sigma$	CV
B00-1	0.104				A00-1	nd			
B00-2	0.108				A00-2	0.119			
B00-3	nd	0.106	0.003	3%	A00-3	0.143	0.131	0.017	13%
B05-1	1.136				A05-1	0.614			
B05-2	<b>0.110</b>				A05-2	0.893			
B05-3	1.142	1.139	0.004	0.3%	A05-3	<b>0.107</b>	0.753	0.197	26%
B10-1	0.779				A10-1	0.136			
B10-2	2.031				A10-2	0.708			
B10-3	0.531	1.114	0.804	72%	A10-3	nd	0.422	0.404	96%
B20-1	3.271				A20-1	3.964			
B20-2	2.087				A20-2	4.137			
B20-3	2.441	2.600	0.608	23%	A20-3	3.374	3.825	0.400	10%
	$G_F$ Pmax N/mm	$G_F$ Pmax N/mm	$\sigma$	CV					
C00-1	0.273								
C00-2	0.225								
C00-3	0.236	0.245	0.026	10%					
C05-1	1.199								
C05-2	<b>0.052</b>								
C05-3	0.133	0.666	0.753	113%					
C10-1	0.643								
C10-2	0.334								
C10-3	0.603	0.527	0.168	32%					
C20-1	4.675								
C20-2	4.429								
C20-3	2.125	3.743	1.407	38%					



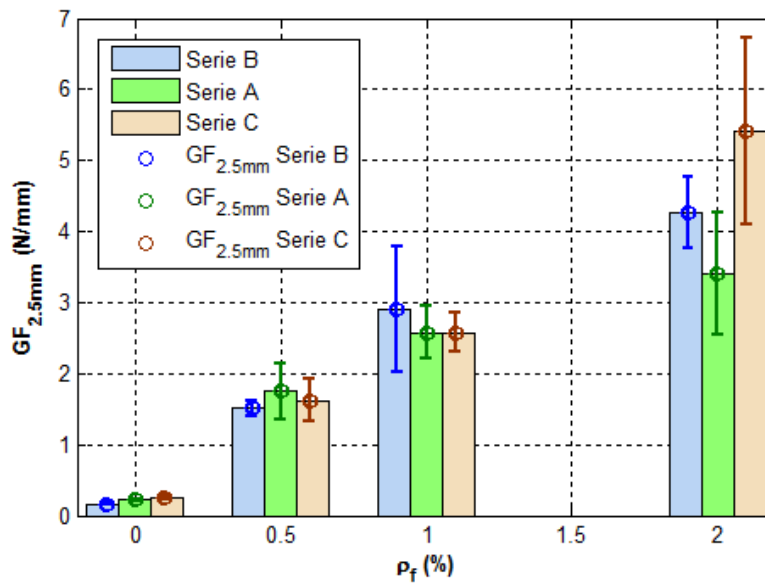
**Gráfica 18. Energía de fractura en flexión hasta Pmax comparación entre series**

Tabla 22. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=2.5$  mm

	$G_f$ 2.5mm N/mm	$G_f$ 2.5mm N/mm	$\sigma$	CV		$G_f$ 2.5mm N/mm	$G_f$ 2.5mm N/mm	$\sigma$	CV
B00-1	0.161				A00-1	nd			
B00-2	0.169				A00-2	0.216			
B00-3	nd	0.165	0.006	3%	A00-3	0.220	0.218	0.003	1%
B05-1	1.586				A05-1	2.028			
B05-2	0.975				A05-2	1.468			
B05-3	1.426	1.506	0.113	7.5%	A05-3	0.944	1.748	0.396	23%
B10-1	2.296				A10-1	2.307			
B10-2	3.915				A10-2	2.833			
B10-3	2.513	2.908	0.879	30%	A10-3	nd	2.570	0.371	14%
B20-1	4.548				A20-1	4.379			
B20-2	3.689				A20-2	3.082			
B20-3	4.575	4.271	0.504	12%	A20-3	2.740	3.400	0.864	25%

	$G_f$ 2.5mm N/mm	$G_f$ 2.5mm N/mm	$\sigma$	CV
C00-1	0.288			
C00-2	0.236			
C00-3	0.236	0.253	0.030	12%
C05-1	1.831			
C05-2	1.142			
C05-3	1.406	1.619	0.300	19%
C10-1	2.887			
C10-2	2.400			
C10-3	2.438	2.575	0.271	11%
C20-1	6.920			
C20-2	4.728			
C20-3	4.588	5.412	1.308	24%



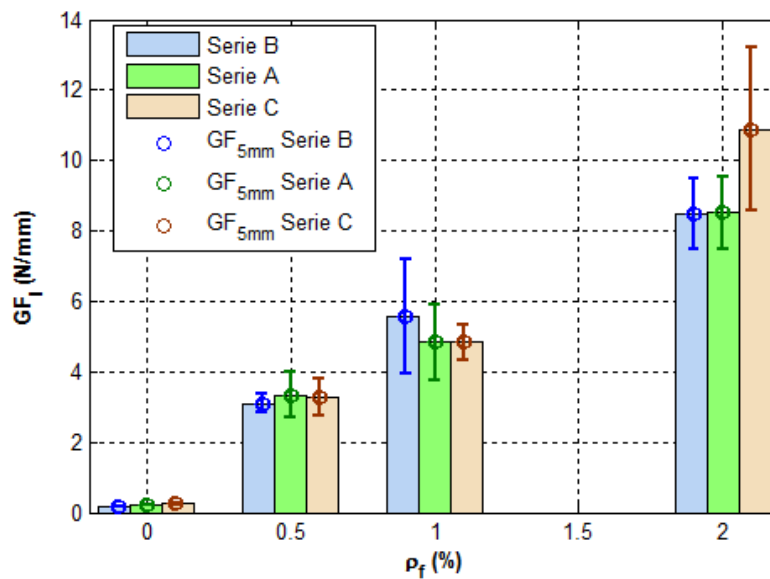
Gráfica 19. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=2.5$  mm comparación entre series

Tabla 23. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=5\text{mm}$

	$G_f$ 5 N/mm	$G_f$ 5 N/mm	$\sigma$	CV		$G_f$ 5 N/mm	$G_f$ 5 N/mm	$\sigma$	CV
B00-1	0.161				A00-1	nd			
B00-2	0.169				A00-2	0.216			
B00-3	nd	0.165	0.006	3%	A00-3	0.220	0.218	0.003	1%
B05-1	3.274				A05-1	3.807			
B05-2	2.044				A05-2	2.878			
B05-3	2.907	3.091	0.259	8.4%	A05-3	1.885	3.343	0.657	20%
B10-1	4.516				A10-1	4.061			
B10-2	7.445				A10-2	5.597			
B10-3	4.714	5.558	1.637	29%	A10-3	nd	4.829	1.086	22%
B20-1	9.187				A20-1	9.511			
B20-2	7.351				A20-2	8.533			
B20-3	8.972	8.503	1.004	12%	A20-3	7.481	8.508	1.015	12%

	$G_f$ 5 N/mm	$G_f$ 5 N/mm	$\sigma$	CV
C00-1	0.288			
C00-2	0.236			
C00-3	0.236	0.253	0.030	12%
C05-1	3.634			
C05-2	2.287			
C05-3	2.895	3.264	0.522	16%
C10-1	5.351			
C10-2	4.366			
C10-3	4.771	4.829	0.495	10%
C20-1	13.468			
C20-2	10.143			
C20-3	9.045	10.885	2.303	21%



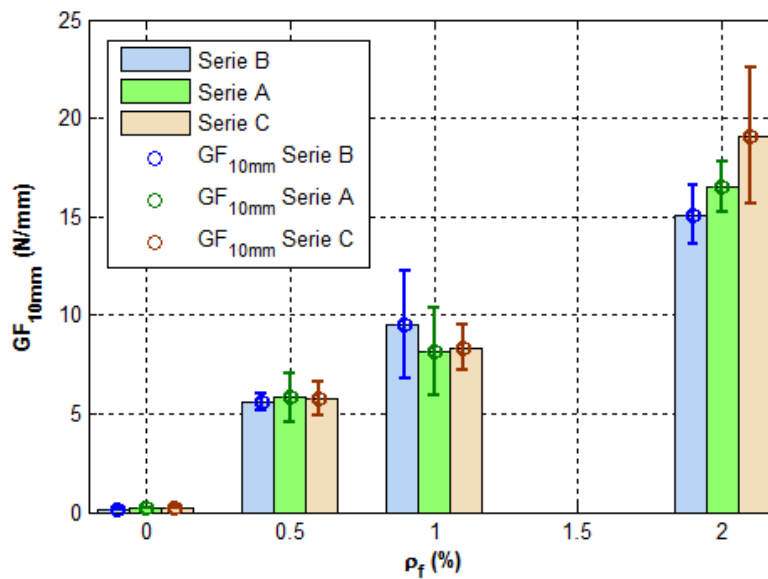
Gráfica 20. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=5\text{ mm}$   
comparación entre series

**Tabla 24. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=10$  mm**

	$G_f$ 10 N/mm	$G_f$ 10 N/mm	$\sigma$	CV		$G_f$ 10 N/mm	$G_f$ 10 N/mm	$\sigma$	CV
B00-1	0.161				A00-1	nd			
B00-2	0.169				A00-2	0.216			
B00-3	nd	0.165	0.006	3%	A00-3	0.220	0.218	0.003	1%
B05-1	5.897				A05-1	6.662			
B05-2	3.922				A05-2	4.950			
B05-3	5.280	5.589	0.437	7.8%	A05-3	3.464	5.806	1.211	21%
B10-1	7.876				A10-1	6.570			
B10-2	12.695				A10-2	9.702			
B10-3	8.002	9.524	2.746	29%	A10-3	nd	8.136	2.215	27%
B20-1	16.304				A20-1	17.445			
B20-2	13.376				A20-2	17.093			
B20-3	15.625	15.101	1.533	10%	A20-3	15.029	16.523	1.305	8%

	$G_f$ 10 N/mm	$G_f$ 10 N/mm	$\sigma$	CV
C00-1	0.288			
C00-2	0.236			
C00-3	0.236	0.253	0.030	12%
C05-1	6.387			
C05-2	4.144			
C05-3	5.142	5.764	0.881	15%
C10-1	8.793			
C10-2	7.026			
C10-3	9.252	8.357	1.176	14%
C20-1	22.652			
C20-2	18.940			
C20-3	15.732	19.108	3.463	18%



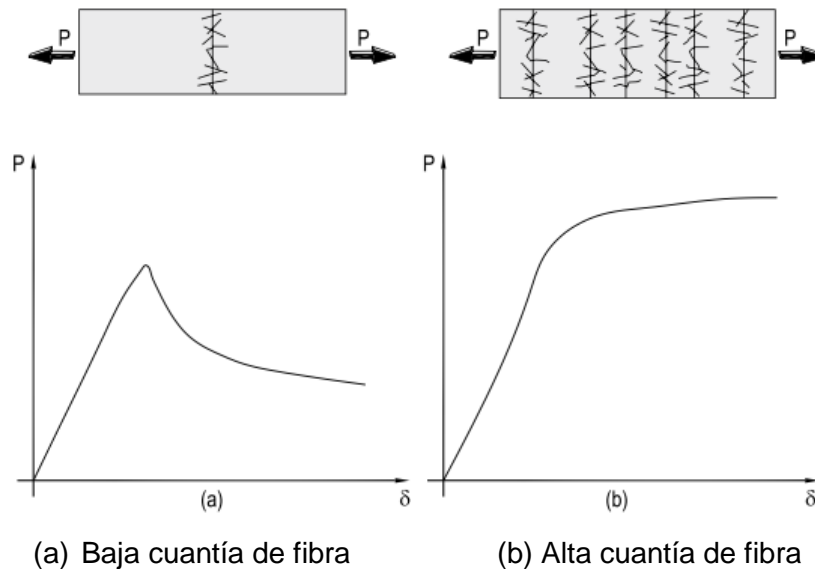
**Gráfica 21. Energía de fractura en flexión hasta  $\delta=10$  mm  
Comparación entre series**

## 6 COMPORTAMIENTO EN Tensión

La forma más directa de caracterizar la fractura en Modo I (apertura) es por medio de la tracción uniaxial o tensión directa. La adición de fibras cortas de acero modifica el comportamiento a tensión del concreto (KUMAR y BARAI, 2011).

Evidenciado por diferentes investigaciones sobre comportamiento (VILLALÓN, 2012), (CHUANBO, 2006), (SALAZAR, 2010) se ha demostrado que la adición de fibras cortas de acero modifica el comportamiento a tensión así:

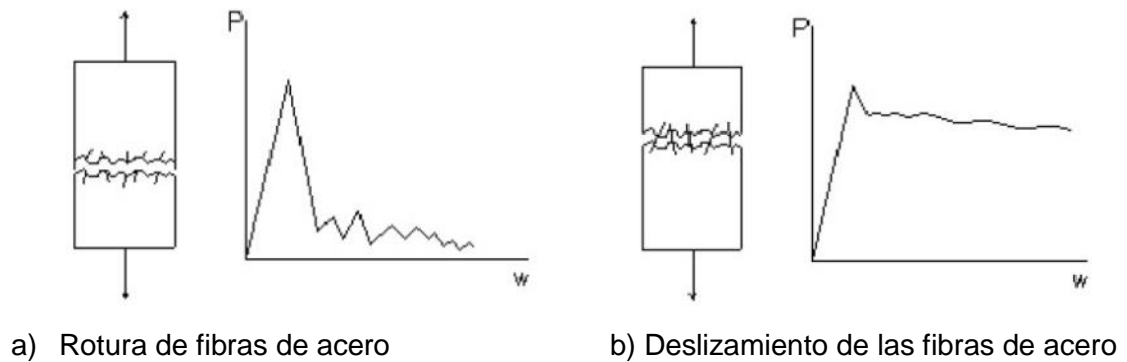
- En cuantías de fibra superiores (mayores a 1.5% en volumen) se incrementa la resistencia a tracción del concreto. Ver Figura 21.
- Modifica el comportamiento postpico en las curvas de respuesta carga – deformación por rotura de las fibras de acero y también por deslizamiento. En la práctica se pueden observar ambos comportamientos de las fibras simultáneamente. Ver Figura 22.



**Figura 21. Modificación del comportamiento a tensión por contenido de fibra**

Tomada de (BARRAGÁN, 2002)





**Figura 22. Comportamiento a tensión de las mezclas fibra reforzadas**

Tomada de (BARRAGÁN, 2002)

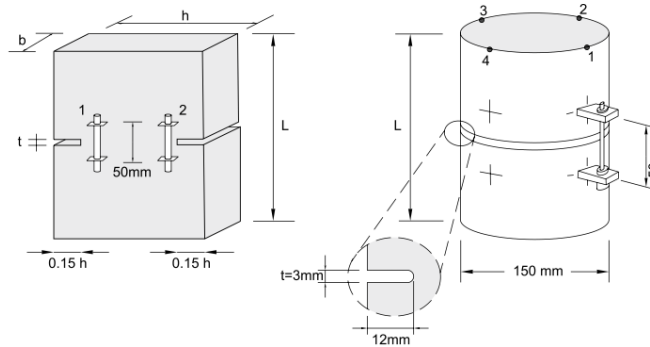
Los ensayos para la determinación de la resistencia a tensión del concreto más comunes se presentan en la Figura 23. Algunos de los ensayos se han modificado mediante la adición de fisuras inducidas para facilitar la medición. Los ensayos de tensión no han estado exentos de complicaciones por la necesidad de utilizar anclajes químicos y mecánicos los cuales derivan en fuentes disipatorias indeseables. (BARRAGÁN, 2002)

Los montajes con probetas cilíndricas y prismáticas, mostradas en la Figura 23, corresponden a ensayos de tracción pura para concreto fibroreforzado según norma italiana UNI U73041440 (ENIU, 2004) debido a las dificultades prácticas de llevar ensayos de tracción pura se ha generalizado además el ensayo de tracción indirecta.

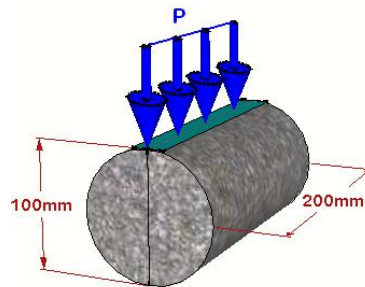
Para la presente investigación y en sintonía con otros trabajos sobre concreto reforzado con fibras de acero se adoptó el ensayo a tracción indirecta también conocido como método Brasileiro NTC 722 (ICONTEC, 2004), adopción nacional del ASTM C496. El montaje del ensayo se ilustra en la Figura 24.

En el trabajo de (PLANAS et al., 2005) y Rocco et al. se han realizado propuestas para la construcción de la curva de ablandamiento del concreto utilizando la tracción indirecta, toda vez que su valor se aproxima al valor de tensión uniaxial pura del concreto, y además posee como ventajas la sencillez en el montaje y algunas investigaciones realizadas con este ensayo que facilitan la comparación. Por ello de acá en adelante se trabajará con el ensayo brasileiro y se adoptará el valor de tracción indirecta ( $f_{ts}$ ) como la resistencia a tensión del concreto ( $f_t$ ).

$$f_{ts} \approx f_t$$



**Figura 23. Ensayos comunes para la determinación de la tensión del concreto**  
Tomada de (BARRAGÁN, 2002)



**Figura 24. Ensayo de tracción indirecta**

## 6.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se elaboraron (48) probetas cilíndricas de  $\phi 100\text{mm}$  por 200mm de alto, simultáneamente con las probetas para los otros ensayos. Por cada una de las mezclas se produjeron (4) cilindros para el ensayo de tracción indirecta el cual se llevó a cabo de acuerdo a las disposiciones de la NTC 722 (ICONTEC, 2004).

En la Tabla 25 se presenta el registro de las probetas realizadas por cada una de las muestras, así como la edad alcanzada al momento de la rotura.

**Tabla 25. Probetas ensayadas a tracción indirecta**

Serie	Cilindros	Elabora	Ensayo	Edad (d)	Serie	Cilindros	Elabora	Ensayo	Edad (d)
M.A00	4	12-may-12	23-jun-12	42	M.B10	4	16-jun-12	25-jul-12	39
M.A05	4	12-may-12	23-jun-12	42	M.B20	4	16-jun-12	14-jul-12	28
M.A10	4	26-may-12	27-jun-12	32	M.C00	4	07-jul-12	04-ago-12	28
M.A20	4	26-may-12	27-jun-12	32	M.C05	4	07-jul-12	04-ago-12	28
M.B00	4	02-jun-12	30-jun-12	28	M.C10	4	28-jul-12	27-ago-12	30
M.B05	4	02-jun-12	30-jun-12	28	M.C20	4	28-jul-12	27-ago-12	30

Los ensayos se realizaron en la máquina Universal Shimadzu UT100-A del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se aplicó la compresión con la celda de carga a una tasa de 1mm/min hasta alcanzar la carga máxima, y una vez inicia y se estabiliza la descarga se aumenta a 3mm/min, hasta cuando el ensayo se detiene por rotura completa de la probeta, esto último en el caso de las probetas sin fibra, o hasta cuando la mezcla empieza a sufrir aplastamiento y distorsiones en la respuesta, momento en el cual se juzga que la probeta no se encuentra trabajando a tracción indirecta.

Durante el ensayo se toman lecturas con deformímetros de 1 pulgada de carrera y precisión de centésimas de milímetro, los datos son capturados con el programa de adquisición de datos LabView a una tasa de 5 datos por segundo, por lo cual se deberá realizar a concatenación de datos explicada en el Apéndice A. En la Fotografía 7 se muestra el montaje y la instrumentación realizada.

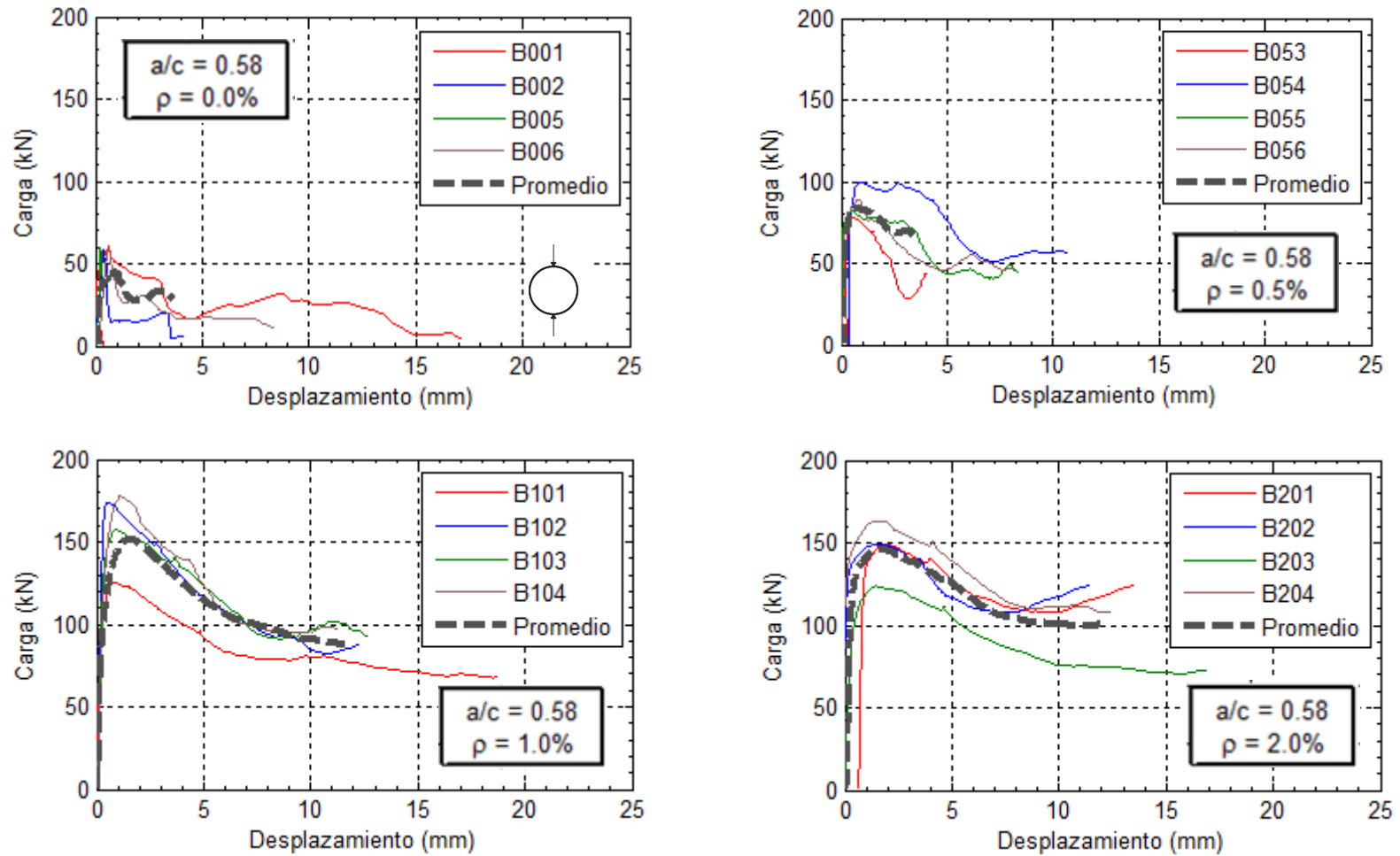
Las lecturas de los deformímetros se suavizan y suman para obtener teóricamente la apertura de fisura en el centro de la probeta. En la mayoría de ensayos la fisura se produjo en el centro, en algunas se presentó más de una fisura.

De la Gráfica 22 a la Gráfica 24 se presentan las curvas carga – flecha para las muestras falladas a tracción indirecta, la flecha para este caso corresponde a la deflexión de la muestra en el sentido perpendicular a la aplicación de la carga y que se asume como la apertura de una fisura central, como se ilustra en la Figura 24.



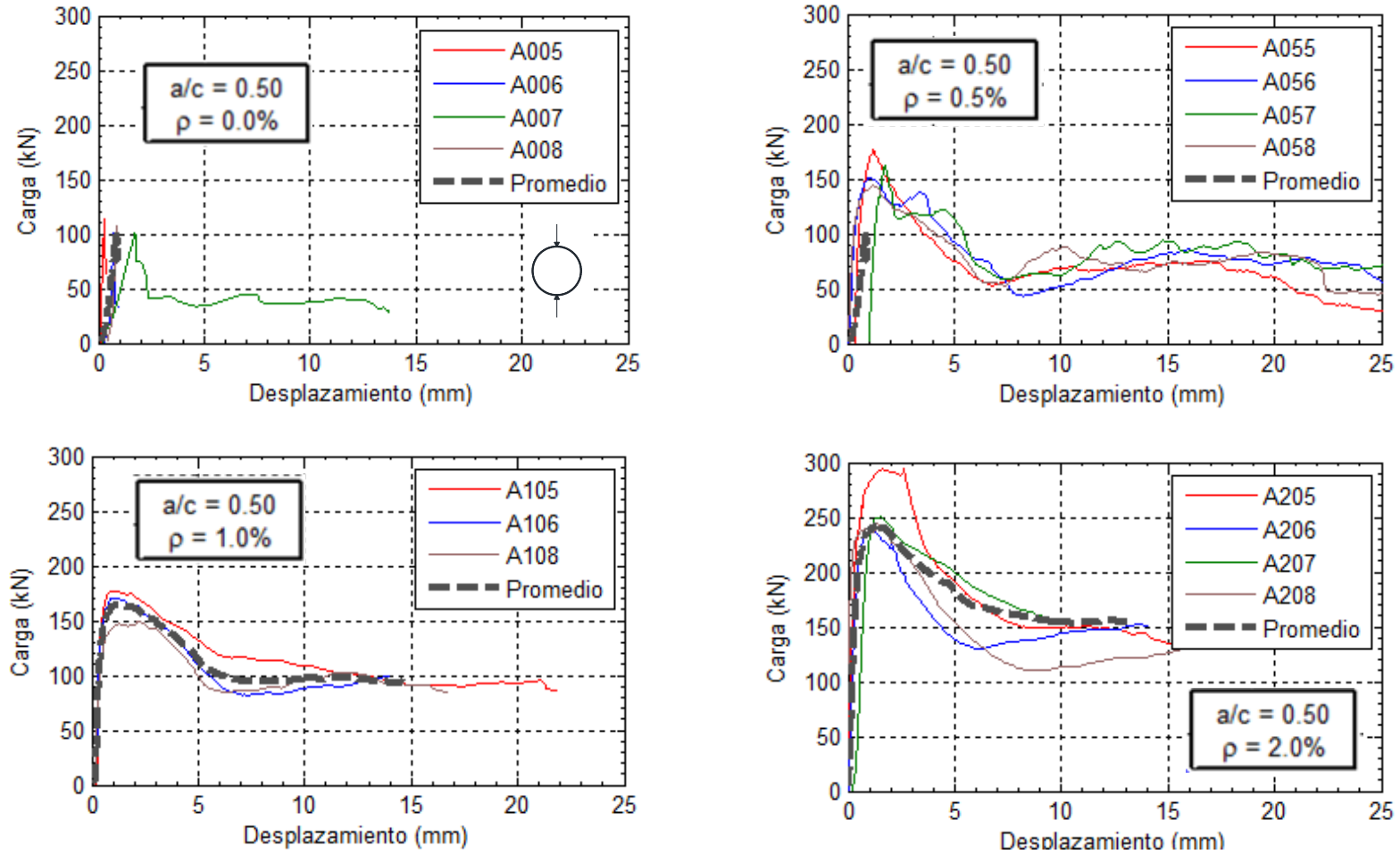
Fotografía 7. Montaje e instrumentación del ensayo

6.1.1 Serie B



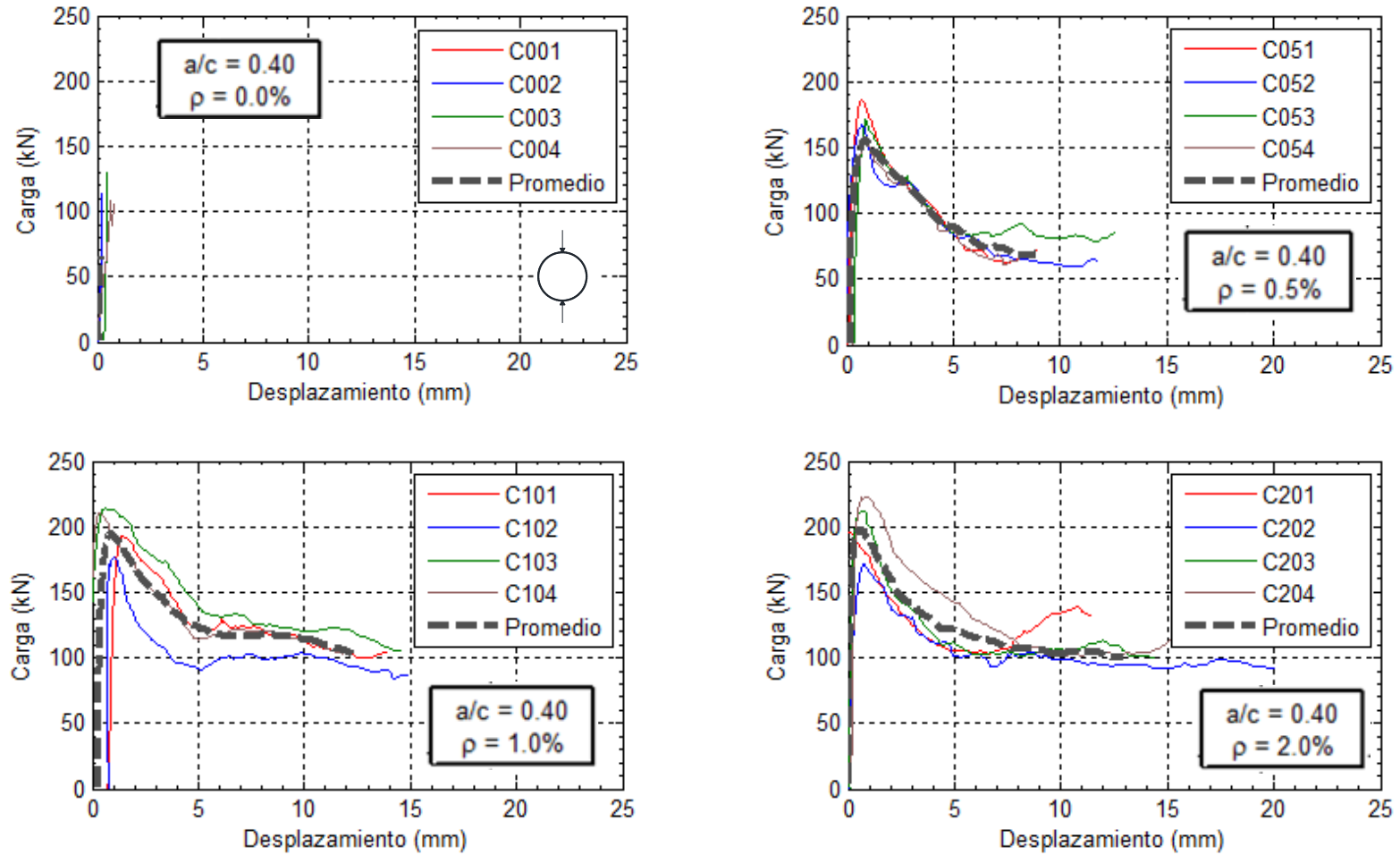
Gráfica 22. Comportamiento en tracción indirecta Serie B  
( $a/c = 0.58$ )

6.1.2 Serie A



Gráfica 23. Comportamiento en tracción indirecta Serie A  
(a/0.50)

### 6.1.3 Serie C



Gráfica 24. Comportamiento en tracción indirecta Serie C  
( $a/c = 0.40$ )

## 6.2 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

La resistencia a la tracción indirecta de las muestras se estimó con la fórmula de la NTC 722 (ICONTEC, 2004), así:

$$f_{ts} = \frac{2Pu}{\pi DL} \quad \text{Ec. 6.1}$$

Dónde:

$P_u$ : Carga máxima alcanzada

D: Diámetro medido de la probeta

L: Largo de la probeta

**Tabla 26. Resistencia a la tracción indirecta**

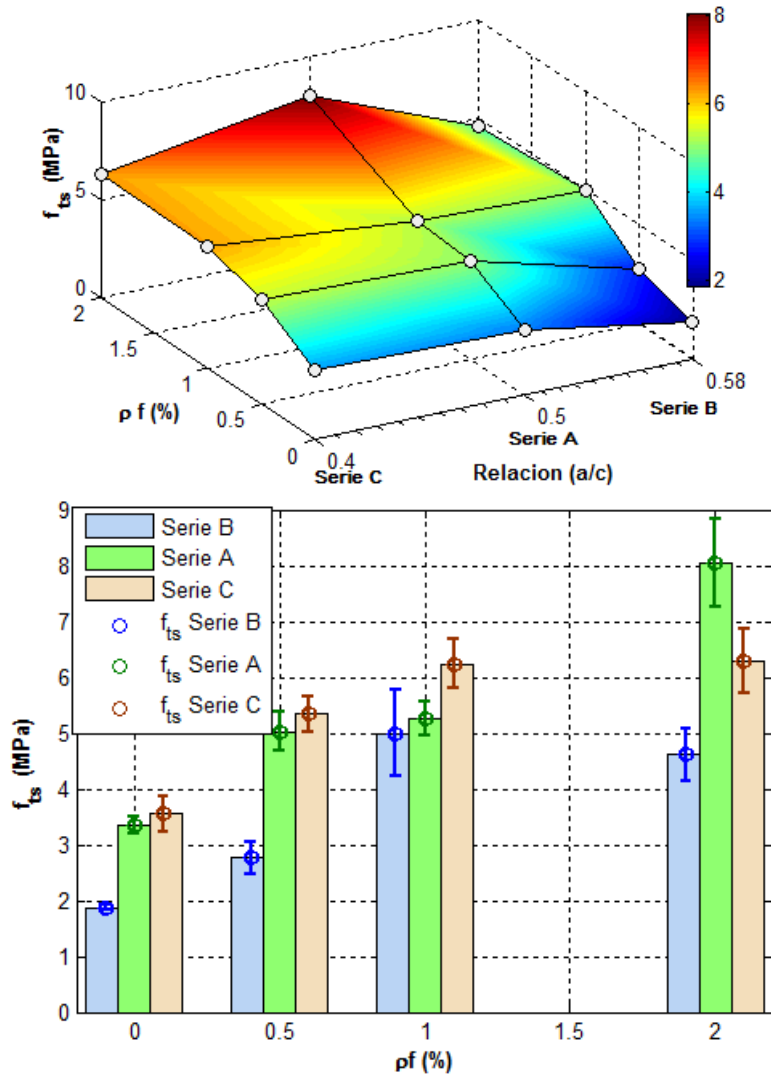
Relación a/c	f'c prom MPa	$\rho_f$ %	Probeta	Edad	D mm	L mm	$P_u$ KN	$f_{ts}$ MPa	$f_{ts}$ media MPa	S MPa	CV
0,58	25,4	0,0	B00-1	28	99	200	60,6	1,95	1,87	0,05	2,5%
			B00-2	28	102	200	58,6	1,83			
			B00-5	28	102	200	59,9	1,87			
			B00-6	28	102	200	58,9	1,84			
		0,5	B05-3	28	101	200	78,4	2,47	2,76	0,24	8,8%
			B05-4	28	101	201	99,6	3,12			
			B05-5	28	100	200	82,4	2,62			
			B05-6	28	100	200	89,0	2,83			
		1,0	B10-1	28	101	201	125,2	3,93	5,00	0,67	13,4%
			B10-2	39	100	202	173,8	5,48			
			B10-3	39	101	200	157,2	4,95			
			B10-4	39	101	199	178,0	5,64			
		2,0	B20-1	28	100	201	148,9	4,72	4,61	0,42	9,0%
			B20-2	28	101	202	148,9	4,65			
			B20-3	28	100	199	123,8	3,96			
			B20-4	28	101	201	163,3	5,12			
0,5	27,5	0,0	A00-5	42	101	200	113	3,56	3,34	0,15	4,4%
			A00-6	42	100	200	100,7	3,2			
			A00-7	42	100	201	101,3	3,21			
			A00-8	42	102	202	109,7	3,39			
		0,5	A05-5	42	101	200	176,3	5,56	5,03	0,36	7,1%
			A05-6	42	101	200	151,4	4,77			
			A05-7	42	100	201	162,5	5,15			
			A05-8	42	99	199	143,7	4,64			
		1,0	A10-5	32	101	202	177,3	5,53	5,26	0,3	5,7%
			A10-6	32	101	200	170,9	5,39			
			A10-7	32	99	200	166,9	5,36			
			A10-8	32	100	200	149,3	4,75			
		2,0	A20-5	32	100	199	294,2	9,41	7,53	7,61	
			A20-6	32	101	200	239	7,53			
			A20-7	32	102	205	250,1	7,61			



Relación a/c	f'c prom MPa	$\rho_f$ %	Probeta	Edad	D mm	L mm	Pu KN	fts MPa	fts <sub>media</sub> MPa	S MPa	CV
0,4	41,2		A20-8	32	101	202	243,6	7,6	8,04	0,79	9,9%
			C00-1	49	101	201	103,9	3,26			
			C00-2	28	101	202	113,7	3,55			
			C00-3	28	101	201	129,3	4,05			
			C00-4	28	102	203	108,5	3,34	3,55	0,31	8,7%
			C05-1	28	102	202	186,3	5,76			
			C05-2	28	100	199	167,1	5,35			
			C05-3	28	101	201	171,6	5,38			
			C05-4	28	100	200	153,2	4,88	5,34	0,31	5,8%
			C10-1	30	101	202	192,9	6,02			
			C10-2	30	100	200	177,1	5,64			
			C10-3	30	101	199	214,2	6,78			
			C10-4	30	102	203	210,4	6,47	6,23	0,44	7,0%
			C20-1	30	100	199	195,8	6,26			
			C20-2	30	101	199	170,8	5,41			
			C20-3	30	103	203	211,7	6,45			
			C20-4	30	100	202	222,9	7,02	6,29	0,58	9,2%

**6.2.1 Comparación entre las series.** Se encontraron incrementos en la resistencia a tracción indirecta conforme se aumenta la calidad del concreto (relación a/c y resistencia a la compresión), y también conforme aumenta la adición de fibra metálica. Véase Gráfica 25.

Similar a lo observado en otras series, la dispersión, determinada con la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV), se incrementa en las mezclas con alta dosificación de fibra; 1% y 2%. Como se puede apreciar en la Gráfica 25.



**Gráfica 25. Comparación de la resistencia a la tracción indirecta de las muestras**

Es de notar, sin embargo, que tanto para la serie B como para la serie C en la cuantía del 2% disminuía levemente la resistencia a la tracción indirecta con relación a las mezclas con 1.5%. Ello coincide con lo observado experimentalmente en el sentido de que las mezclas de mayor resistencia presentaron roturas frágiles súbitas. En la Tabla 27 se cuantifican dichos incrementos, dentro de los cuales se puede admitir que una adición de 0.5% de fibra metálica al concreto simple otorga en promedio un 50% más de resistencia a la tracción. Para las otras cuantías no es tan claro ese incremento.

**Tabla 27. Variación de la resistencia a tracción indirecta**

ρf (%)	SERIE B a/c: 0.58 f'c <sub>prom</sub> : 25.4 MPa		SERIE A a/c: 0.50 f'c <sub>prom</sub> : 27.5 MPa		SERIE C a/c: 0.40 f'c <sub>prom</sub> : 41.2 MPa	
	f <sub>ts</sub> (MPa)	Variación	f <sub>ts</sub> (MPa)	Variación	f <sub>ts</sub> (MPa)	Variación
0.0	1.87		3.34		3.55	
0.5	2.76	47.7%	5.03	50.6%	5.34	50.4%
1.0	5.00	81.0%	5.26	4.6%	6.23	16.6%
2.0	4.61	-7.8%	8.04	52.9%	6.29	0.9%

### 6.3 ENERGÍA DE FRACTURA MODO I

La energía de fractura se estimó por medio del modelo de fisura cohesiva, utilizando la expresión que vincula el trabajo de fractura con el área inicial que liga las dos caras de la fisura, la expresión general RILEM debida a (HILLERBORG, 1978) se puede expresar como:

$$G_F = \frac{W_F}{Alig} \quad \text{Ec. 6.2}$$

Dónde:

G<sub>F</sub> = Tasa de liberación de energía o energía de fractura del modelo de fisura cohesiva

W<sub>F</sub>= Trabajo de fractura, área bajo la curva carga-flecha.

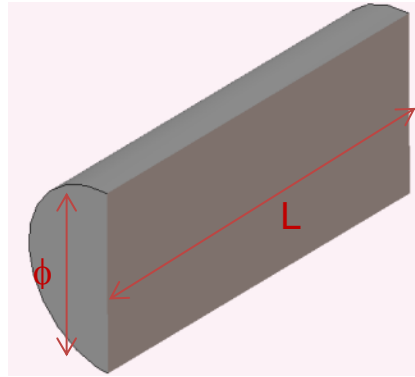
Alig= Área inicial de ligamento entre las dos caras de la fisura

Basada en la geometría de la muestra la fórmula de energía de fractura para el modo I se presenta como:

$$G_F = \frac{W_F}{L \cdot \phi} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Como sucedió con los demás ensayos realizados, no es posible recorrer la totalidad de la curva de ablandamiento, ya sea porque ocurre la falla frágil en el caso del concreto simple, o bien porque en determinado punto la muestra comienza a sufrir fallas por aplastamiento con lo cual deja de ser válida la lectura de apertura de fisura.

Para sortear esta situación se leen las energías de fractura hasta desplazamientos prefijados, con el fin de poder analizar y comparar los valores entre sí. En concordancia con los demás capítulos del trabajo se seleccionan deflexiones hasta la carga máxima, P<sub>max</sub>, 2.5mm, 5mm y 10mm. Dichas deflexiones no son alcanzadas por todas las muestras, siendo esto de por sí indicio de la ganancia en ductilidad.



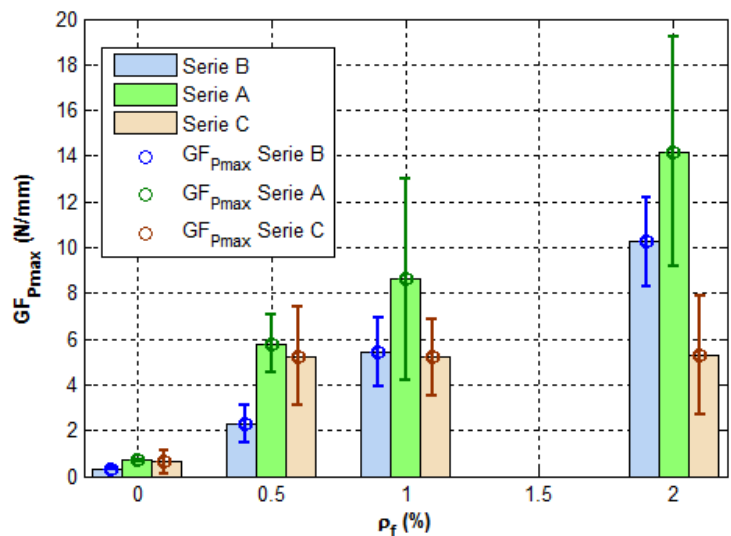
**Figura 25. Área de ligamento para el ensayo de tracción indirecta**

Desde la Tabla 28 hasta la Tabla 31 se presentan las energías de fractura Modo I para las diferentes deflexiones consideradas, con su respectiva desviación estándar de la muestra y CV (coeficiente de variación en porcentaje), calculado como el cociente entre la desviación estándar y el promedio.

**Tabla 28. Energía de fractura hasta Pmax**

#	$G_F P_{max}$ N/mm	CV	#	$G_F P_{max}$ N/mm	CV
B00-1	0,328		A00-5	0,610	
B00-2	0,306		A00-6	0,711	
B00-5	0,386		A00-7	0,716	
B00-6	0,337	0,339±0,034 10%	A00-8	0,712	0,678 ±0,059 9%
B05-3	1,230		A05-5	5,711	
B05-4	2,441		A05-6	6,063	
B05-5	2,251		A05-7	4,198	
B05-6	3,181	2,276 ±0,804 35%	A05-8	7,213	5,796 ±1,244 21%
B10-1	5,083		A10-5	5,753	
B10-2	3,773		A10-6	6,352	
B10-3	5,532		A10-7	-	
B10-4	7,342	5,432 ±1,476 27%	A10-8	13,707	8,604 ±4,429 51%
B20-1	8,206		A20-5	20,363	
B20-2	11,167		A20-6	9,351	
B20-3	7,672		A20-7	10,993	
B20-4	11,385	10,253 ±1,941 19%	A20-8	16,052	14,190 ±5,007 35%

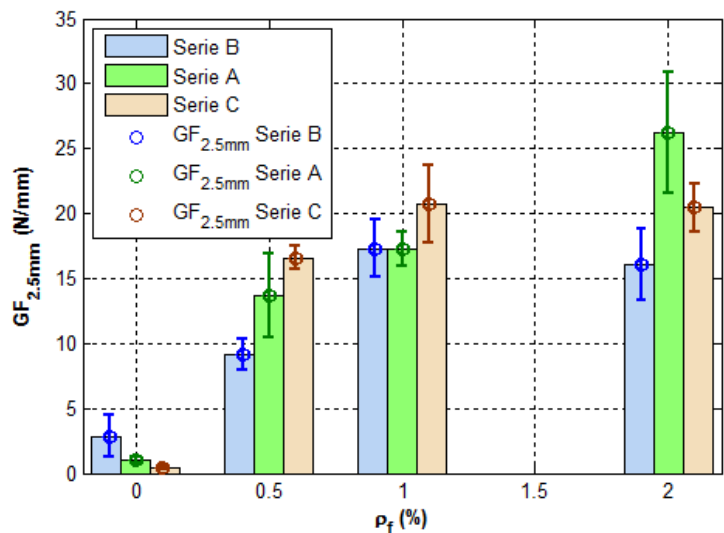
#	$G_F P_{max}$ N/mm	CV
C00-1	0,464	
C00-2	0,248	
C00-3	0,341	
C00-4	1,413	0,616 ±0,538 87%
C05-1	4,193	
C05-2	8,396	
C05-3	3,688	
C05-4	4,621	5,225 ±2,149 41%
C10-1	5,002	
C10-2	3,535	
C10-3	7,540	
C10-4	4,710	5,197 ±1,686 32%
C20-1	2,063	
C20-2	4,447	
C20-3	6,628	
C20-4	8,030	5,292 ±2,609 49%



**Tabla 29. Energía de fractura hasta  $\delta = 2.5\text{mm}$**

#	$G_f$ 2.5 N/mm	CV	#	$G_f$ 2.5 N/mm	CV
B00-1	3,771		A00-5	0,838	
B00-2	3,455		A00-6	1,244	
B00-5	0,455		A00-7	11,011	
B00-6	3,696	2,844 $\pm$ 1,598 56%	A00-8	0,837	0,973 $\pm$ 0,234 24%
B05-3	7,457		A05-5	15,156	
B05-4	10,012		A05-6	15,313	
B05-5	9,738		A05-7	8,871	
B05-6	9,372	9,145 $\pm$ 1,155 13%	A05-8	15,440	13,695 $\pm$ 3,218 23%
B10-1	14,039		A10-5	18,310	
B10-2	18,329		A10-6	17,700	
B10-3	17,962		A10-7	-	
B10-4	18,820	17,288 $\pm$ 2,194 13%	A10-8	15,735	17,248 $\pm$ 1,346 8%
B20-1	12,573		A20-5	32,690	
B20-2	17,774		A20-6	25,278	
B20-3	13,856		A20-7	21,730	
B20-4	18,011	16,119 $\pm$ 2,753 17%	A20-8	25,179	26,219 $\pm$ 4,618 18%

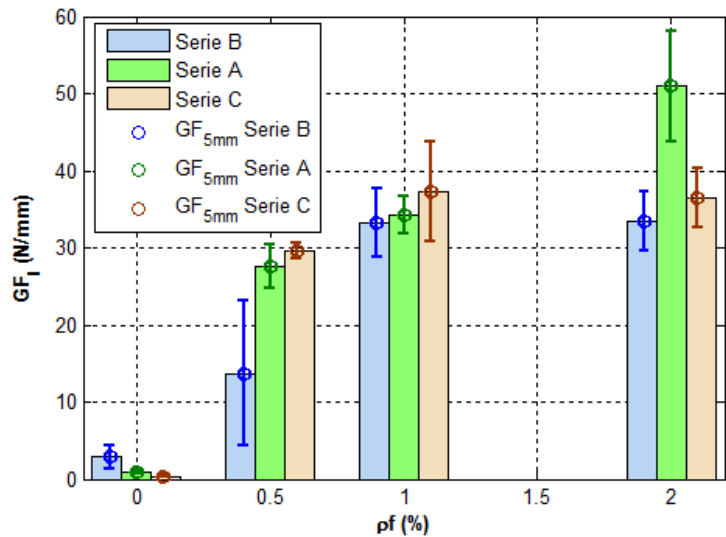
#	$G_f$ 2.5 N/mm	CV
C00-1	0,510	
C00-2	0,331	
C00-3	0,341	
C00-4	2,522	0,394 $\pm$ 0,101 26%
C05-1	17,526	
C05-2	16,405	
C05-3	16,938	
C05-4	15,408	16,569 $\pm$ 0,899 5%
C10-1	20,232	
C10-2	16,869	
C10-3	23,938	
C10-4	22,006	20,761 $\pm$ 3,004 14%
C20-1	21,469	
C20-2	17,798	
C20-3	20,426	
C20-4	22,081	20,444 $\pm$ 1,891 9%



**Tabla 30. Energía de fractura hasta  $\delta = 5\text{mm}$**

#	$G_f$ 5 N/mm	CV	#	$G_f$ 5 N/mm	CV
B00-1	3,771		A00-5	0.838	
B00-2	3,455		A00-6	1.244	
B00-5	0,455		A00-7	11.011	
B00-6	3,696	2,844 $\pm$ 1,598 56%	A00-8	0.837	0.973 $\pm$ 0.234 24%
B05-3	-		A05-5	27.538	
B05-4	21,274		A05-6	30.146	
B05-5	17,444		A05-7	23.565	
B05-6	15,942	13,665 $\pm$ 9,382 69%	A05-8	28.915	27.541 $\pm$ 2.857 10%
B10-1	26,742		A10-5	36.535	
B10-2	35,019		A10-6	34.625	
B10-3	34,694		A10-7	-	
B10-4	36,465	33,230 $\pm$ 4,393 13%	A10-8	31.684	34.281 $\pm$ 2.444 7%
B20-1	29,845		A20-5	61.422	
B20-2	33,966		A20-6	45.832	
B20-3	28,189		A20-7	47.426	
B20-4	36,617	33,476 $\pm$ 3,841 11%	A20-8	48.998	50.919 $\pm$ 7.120 14%

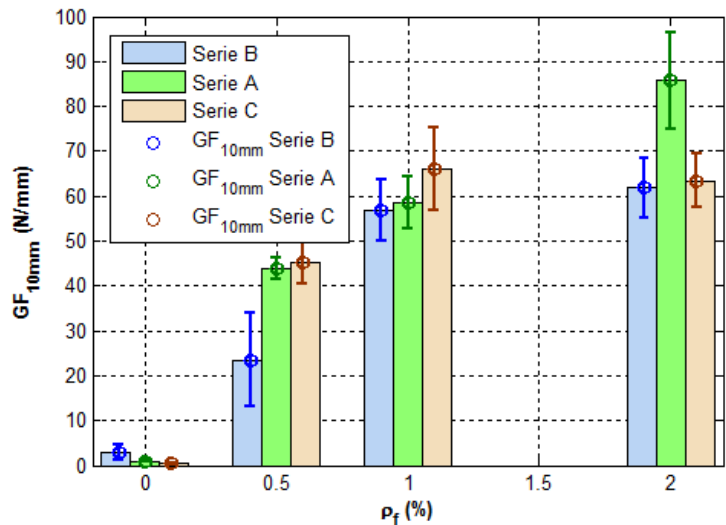
#	$G_f$ 5 N/mm	CV
C00-1	0,510	
C00-2	0,331	
C00-3	0,341	
C00-4	2,522	0,394 $\pm$ 0,101 26%
C05-1	30,623	
C05-2	29,955	
C05-3	29,468	
C05-4	28,393	29,610 $\pm$ 0,939 3%
C10-1	36,661	
C10-2	29,118	
C10-3	44,721	
C10-4	38,792	37,323 $\pm$ 6,446 17%
C20-1	36,590	
C20-2	32,423	
C20-3	35,292	
C20-4	41,652	36,489 $\pm$ 3,857 11%



**Tabla 31. Energía de fractura hasta  $\delta = 10\text{mm}$**

$G_f$ 10 N/mm		CV	$G_f$ 10 N/mm		CV
B00-1	3,771		A00-5	0,838	
B00-2	3,455		A00-6	1,244	
B00-5	0,455		A00-7	11,011	
B00-6	3,696	2,844 $\pm$ 1,598 56%	A00-8	0,837	0,973 $\pm$ 0,234 24%
B05-3	9,893		A05-5	42,884	
B05-4	35,328		A05-6	45,324	
B05-5	24,723		A05-7	40,796	
B05-6	24,055	23,499 $\pm$ 10,438 44%	A05-8	46,479	43,871 $\pm$ 2,539 6%
B10-1	46,841		A10-5	65,047	
B10-2	59,761		A10-6	56,331	
B10-3	59,647		A10-7	-	
B10-4	61,663	56,978 $\pm$ 6,821 12%	A10-8	53,945	58,441 $\pm$ 5,844 10%
B20-1	58,144		A20-5	101,690	
B20-2	61,308		A20-6	79,523	
B20-3	50,304		A20-7	81,915	
B20-4	66,259	61,904 $\pm$ 6,693 11%	A20-8	79,742	85,717 $\pm$ 10,703 12%

$G_f$ 10 N/mm		CV
C00-1	0,510	
C00-2	0,331	
C00-3	0,341	
C00-4	2,522	0,394 $\pm$ 0,101 26%
C05-1	43,694	
C05-2	47,652	
C05-3	50,402	
C05-4	39,514	45,316 $\pm$ 4,748 10%
C10-1	65,882	
C10-2	54,275	
C10-3	76,838	
C10-4	67,340	66,084 $\pm$ 9,251 14%
C20-1	64,857	
C20-2	57,438	
C20-3	60,222	
C20-4	71,116	63,408 $\pm$ 5,981 9%





**6.3.1 Comparación entre las series.** Con los valores promedios de energía de fractura obtenidos se procede a comparar los incrementos en la energía de fractura entre las series conforme se adicionan las fibras metálicas de microrefuerzo.

En la Tabla 32 se presenta el análisis para la carga máxima  $P_{max}$ , así como para las deflexiones 2.5mm, 5mm y 10mm,  $G_F/G_{F0}$  representa la comparación con las muestras de concreto simple; cuando una deflexión no es alcanzada por una muestra se toma la energía de fractura hasta la máxima deflexión lograda.

De la comparación entre series se pueden realizar las siguientes observaciones:

- La Serie A, que es la de menor resistencia, exhibió los mayores incrementos en valores de energía de fractura, se presume que la menor resistencia del concreto favoreció una ganancia mayor de ductilidad a la mezcla.
- Analizando todas las series se puede afirmar que la energía de fractura de una mezcla con cuantía volumétrica de 0.5% de fibra, comparada con una mezcla de concreto simple, es entre 5 a 12 veces mayor, con 1.0% entre 9 a 13 veces y con una de 2% entre 18 a 19 veces más que una muestra de concreto simple.
- No se puede afirmar que exista una correlación lineal entre el aumento de energía de fractura y la cantidad de fibra adicionada, diversos autores (KUMAR y BARAI, 2011) han establecido relaciones exponenciales basadas en trabajos experimentales, sin embargo para el presente caso se requeriría la replicación de ensayos en cuantías diferentes e intermedias a las realizadas, para poder determinar una función o un modelo de predicción.

**Tabla 32. Incremento de GF a tensión indirecta con la adición de fibras**

$\rho_f$ (%)	Serie B		Serie A		Serie C		$G_F/G_{F0}$ promedio
	$G_F/G_{F0}$	$G_F$ Pmax	$G_F/G_{F0}$	$G_F$ Pmax	$G_F/G_{F0}$	$G_F$ Pmax	
0.0	0.339	1.0	0.687	1.0	0.616	1.0	1.0
0.5	2.276	6.7	5.796	8.4	5.225	8.5	7.9
1.0	5.432	16.0	8.604	12.5	5.197	8.4	12.3
2.0	10.253	30.2	14.190	20.6	5.292	8.6	19.8
	<b>GF 2.5</b>		<b>GF 2.5</b>		<b>GF 2.5</b>		
0.0	2.844	1.0	0.973	1.0	0.394	1.0	1.0
0.5	9.145	3.2	13.695	14.1	16.569	42.0	19.8
1.0	17.288	6.1	17.248	17.7	20.761	52.6	25.5
2.0	16.119	5.7	26.219	26.9	20.444	51.8	28.2
	<b>GF 5</b>		<b>GF 5</b>		<b>GF 5</b>		
0.0	2.844	1.0	0.973	1.0	0.394	1.0	1.0
0.5	13.665	4.8	27.541	28.3	29.610	75.1	36.1
1.0	33.230	11.7	34.281	35.2	37.323	94.6	47.2
2.0	33.476	11.8	50.919	52.3	36.489	92.5	52.2
	<b>GF 10</b>		<b>GF 10</b>		<b>GF 10</b>		
0.0	2.844	1.0	0.973	1.0	0.394	1.0	1.0
0.5	23.499	8.3	43.871	45.1	45.316	114.9	56.1
1.0	56.978	20.0	58.441	60.1	66.084	167.6	82.6
2.0	61.904	21.8	85.717	88.1	63.408	160.8	90.2

Un comportamiento reiterativo en los ensayos es que en las muestras con el máximo contenido de fibra no se producen incrementos importantes en la energía de fractura y, por el contrario, en las mezclas B y C disminuyen ligeramente.

Nuevamente, es la mezcla de baja resistencia A la de mejor comportamiento y con la cual se obtienen mayores incrementos en la energía de fractura. Por el contrario, en las muestras B y C se produce un leve descenso en la energía de fractura para la más alta cuantía de fibras.

Nótese que para alcanzar deflexiones de 10mm se requieren, en general, las cuantías mayores de 1 y 2%, la mezcla A presentó la mejor respuesta con el incremento de fibra mientras que las de mayor resistencia exhibieron pérdida de ductilidad cuando se adicionaban con la máxima cuantía volumétrica (2%)

En el capítulo 8 se comparan los valores de energía de fractura de la tracción indirecta con los otros ensayos realizados de flexión y cortante.

## 7 COMPORTAMIENTO EN CORTANTE

Igual que en los demás fenómenos analizados es de esperar un incremento en la ductilidad con la adición de fibras cortas de acero. La fractura a cortante puro corresponde al modo de fractura tipo II, como se presentó en las generalidades.

Los trabajos de investigación apuntan a realizar una estimación objetiva de la ganancia de ductilidad con el aumento en la dosificación de fibras, una de las metodologías experimentales empleadas para dicho fin corresponde a la medición de la respuesta de las probetas de concreto sometidas a cargas de cortante, para las cuales se leen curvas carga – desplazamiento y mediante el cálculo de áreas bajo curva hasta deflexiones determinadas es posible establecer y comparar la ganancia en ductilidad entre muestras.

Para el estudio del fenómeno de cortante se consideró, además de la energía de fractura como parámetro de comparación de la ganancia de ductilidad, la denominada tenacidad absoluta y los índices de tenacidad, cuyos conceptos se amplían posteriormente.

El estándar de ensayo adoptado en el presente trabajo corresponde al delimitado por la sociedad de ingenieros civiles de Japón, el JSCE-SF6 (JSCE, 2002), en detrimento de los ensayos con probeta tipo z, los cuales han sido rechazados en diferentes trabajos (CARMONA y CABRERA, 2009), (MIRSAYAH y BANTHIA, 2002) por el modo mixto de fractura que representan. En la Figura 26 y Figura 27 se presentan respectivamente los ensayos tipo probeta z y el montaje de acuerdo al estándar de ensayo JSCE SF-6 (JSCE, 2002), que fue fabricado durante el presente proyecto y donado al laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería para el estudio de comportamiento a cortante puro.

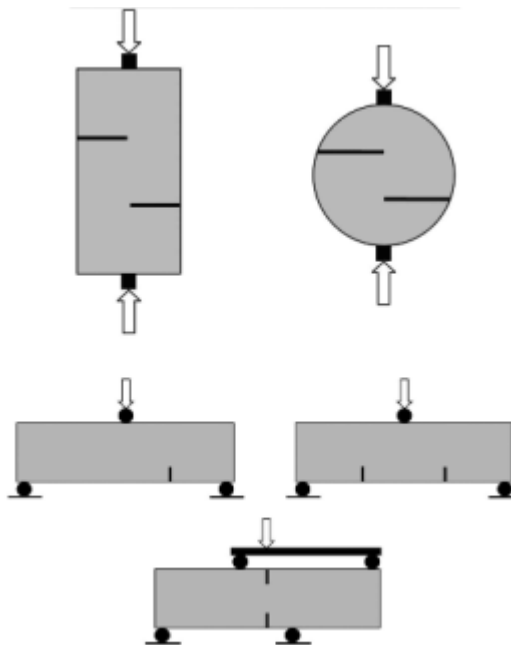


Figura 26. Diferentes probetas para caracterización a cortante del concreto

Tomada de (CARMONA y CABRERA, 2009)

La modificación al ensayo JSCE SF-6 (JSCE, 2002) proviene de los trabajos de investigación (CARMONA y CABRERA, 2009), (MIRSAYAH y BANTHIA, 2002) y consiste en la ranuración de las probetas, dado que es ampliamente aceptado que favorece la formación de planos de falla bien definidos. En ese sentido se adoptó para el presente trabajo la realización de ranuras de 10 mm de profundidad en todo el perímetro de la muestra, de acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 27.

Dentro de la bibliografía consultada se puede encontrar la aplicación del ensayo de corte SF-6 en el trabajo de investigación de (CHUANBO, 2006)

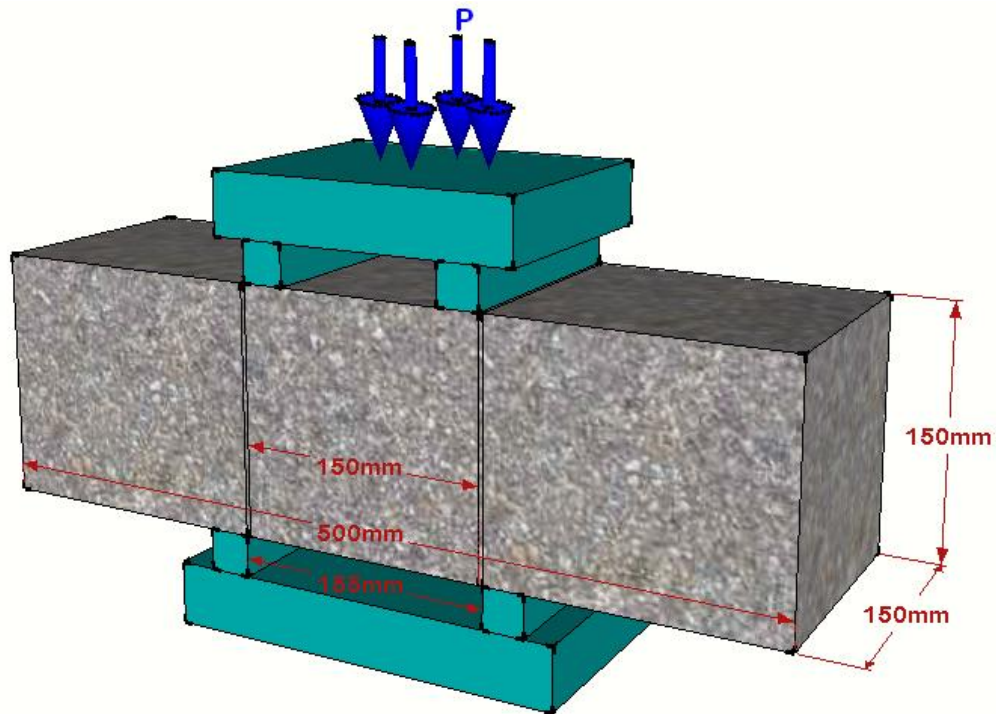


Figura 27. Esquema de montaje del ensayo a corte

## 7.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los ensayos a cortante realizados entre mayo y agosto de 2012 a las probetas de tres muestras diferentes evidenciaron, como era de esperarse, aumento en la tenacidad conforme aumenta la resistencia y la cantidad de fibra.

En términos generales el ensayo mostró ser estable, sin embargo algunas muestras mostraron predilección para fallaren uno de los dos planos de falla inducidos, véase Fotografía 9, ello conlleva a que, por ejemplo, en algún momento del ensayo una de las caras falladas empiece a cabecear y por ende encontrar apoyo, bien sea en el montaje o en la cara que permanece restringida, ello produce distorsión en la curva de respuesta, obligando, cuando el apoyo es total, a suspender el ensayo. Las lecturas de

desplazamiento se realizaron con deformímetros de 25mm de carrera en ambas caras de la probeta. En la Fotografía 8 se ilustra una de las muestras falladas.



**Fotografía 8. Ensayo de corte probeta M.B05-6**



**Fotografía 9. Ensayo de corte probeta M.B00-4**

El tiempo del ensayo fue variable entre muestras, dado que para algunas se debía interrumpir cuando experimentaba los cabeceos o, por ejemplo, en las muestras sin fibra porque sencillamente la falla era frágil.

La velocidad de carga utilizada por la celda de la máquina Shimadzu fue de 0.5 mm/min (la mínima posible y recomendada) hasta alcanzar el pico, dicha velocidad se mantenía en la descarga hasta aproximadamente el 80% de la carga máxima alcanzada, punto en el cual se optaba por aumentar la velocidad a 1.0 mm/min, con el fin de no provocar distorsiones en la respuesta. Los tiempos de toma de datos de la muestra, bajo estas condiciones, se encuentran entre 1.7 min y 29.4 min.

En la Tabla 33 se presentan las edades y tiempos de las muestras falladas a corte; al igual que lo visto en los demás ensayos, muchas muestras se fallaron después de la edad programada a 28 días debido al rezago que produce la cantidad de probetas fabricadas.

**Tabla 33. Edad y duración de ensayos de las probetas a corte**

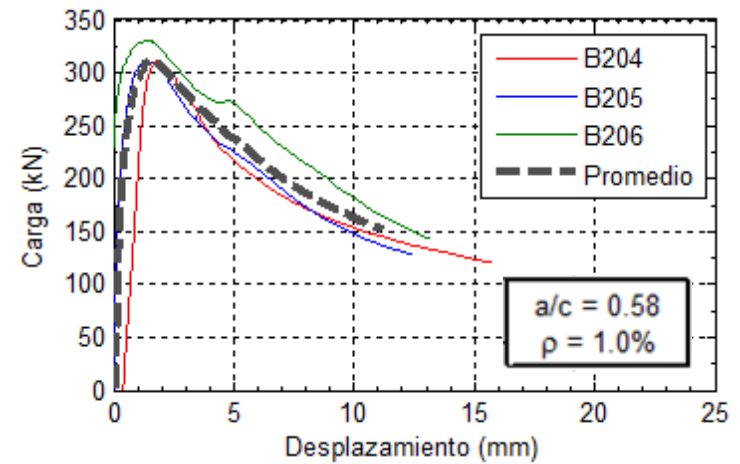
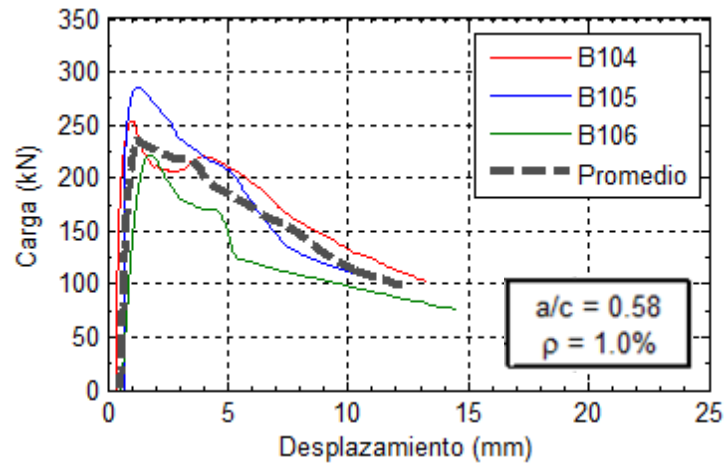
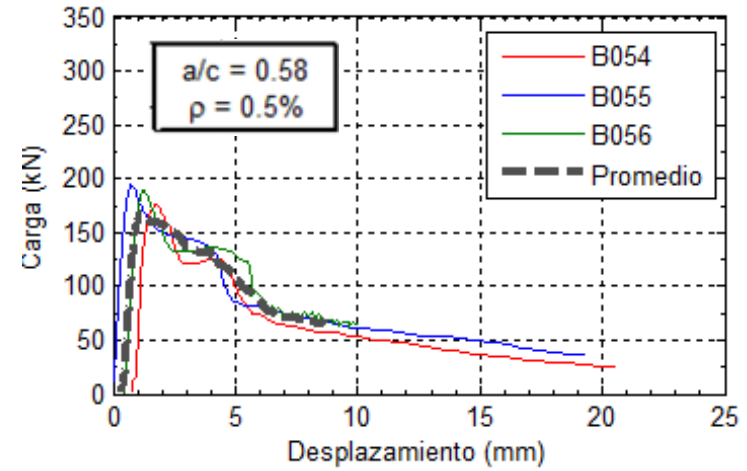
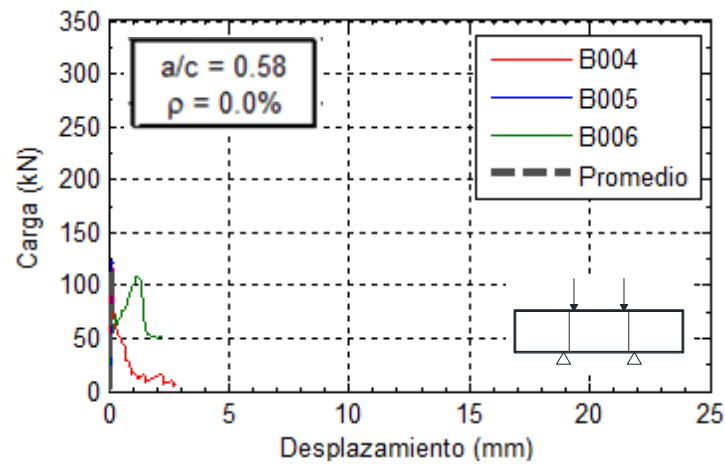
Muestra	Edad (días)	Duración (min)	Muestra	Edad (días)	Duración (min)	Muestra	Edad (días)	Duración (min)
A00-4	42	5.0	B00-4	28	4.5	C00-4	49	3.0
A00-5	42	3.9	B00-5	28	1.7	C00-5	28	5.0
A00-6	42	4.2	B00-6	28	4.8	C00-6	28	3.7
A05-4	42	29.4	B05-4	28	9.0	C05-4	28	8.9
A05-5	42	18.2	B05-5	28	9.5	C05-5	28	13.1
A05-6	42	21.5	B05-6	28	5.6	C05-6	28	10.4
A10-4	32	16.2	B10-4	28	5.6	C10-4	30	17.8
A10-5	32	9.3	B10-5	39	16.2	C10-5	30	19.6
A10-6	32	13.7	B10-6	39	16.4	C10-6	30	12.6
A20-4	32	12.3	B20-4	28	20.3	C20-4	30	18.5
A20-5	32	7.1	B20-5	28	16.9	C20-5	30	25.0
A20-6	32	9.5	B20-6	28	20.0	C20-6	30	13.6

Una vez obtenidos los datos de carga y deformímetros se procedió a realizar el análisis gráfico, con la metodología que se detalla en el ANEXO C. En la Gráfica 26 a Gráfica 28 se visualiza la respuesta de las muestras al fenómeno de cortante y su variación con la adición de fibras, se presentan con la misma escala de ejes coordenados para contrastar mejor lo observado.

Es claro que la adición de fibras otorgó una mayor resistencia al corte y aumentó de manera significativa la ductilidad, lo cual se propone cuantificar a continuación.

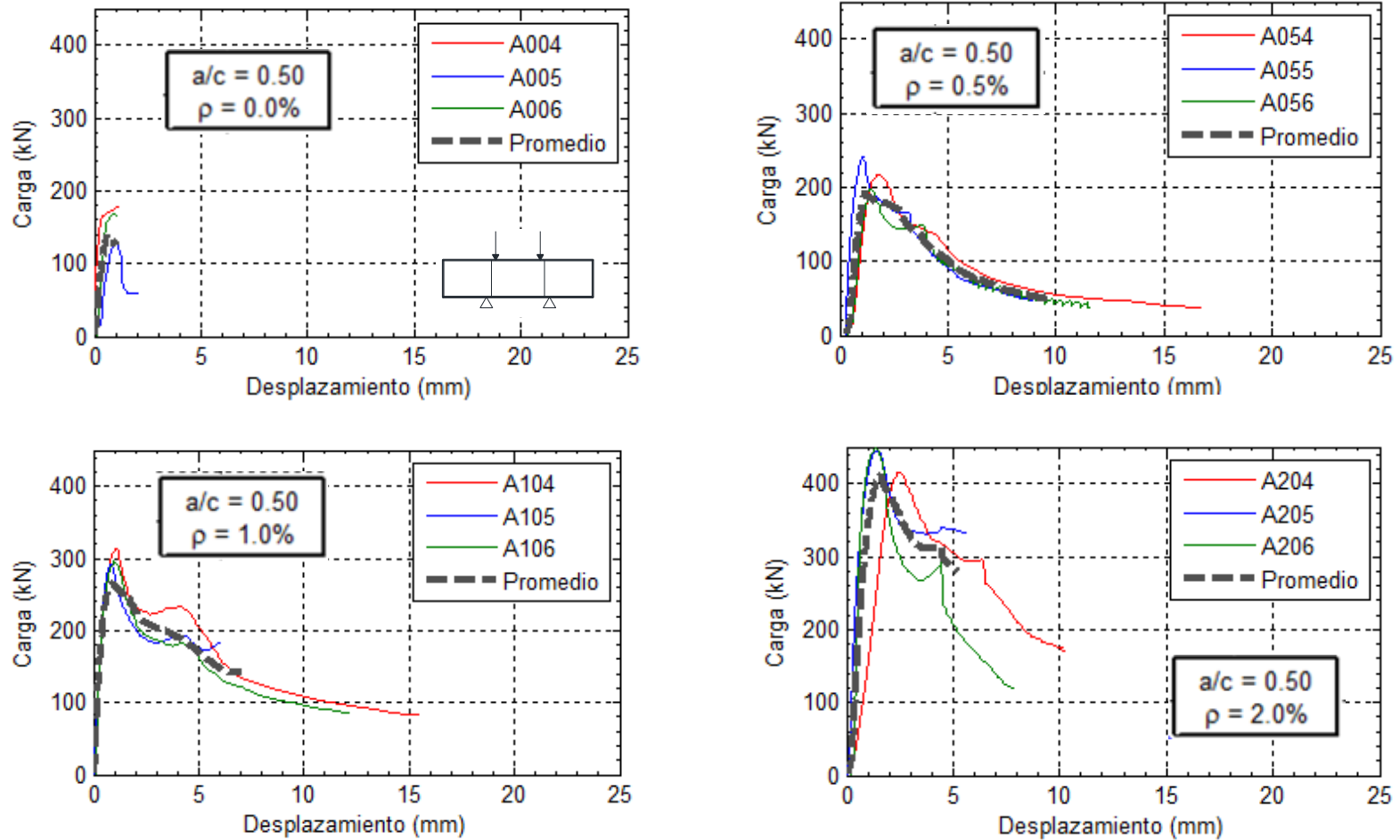
Se visualizan desde la Gráfica 26 hasta la Gráfica 28 las curvas de respuesta a cortante.

### 7.1.1 Serie B



Gráfica 26. Comportamiento en cortante de las probetas Serie B  
( $a/c=0.58$ )

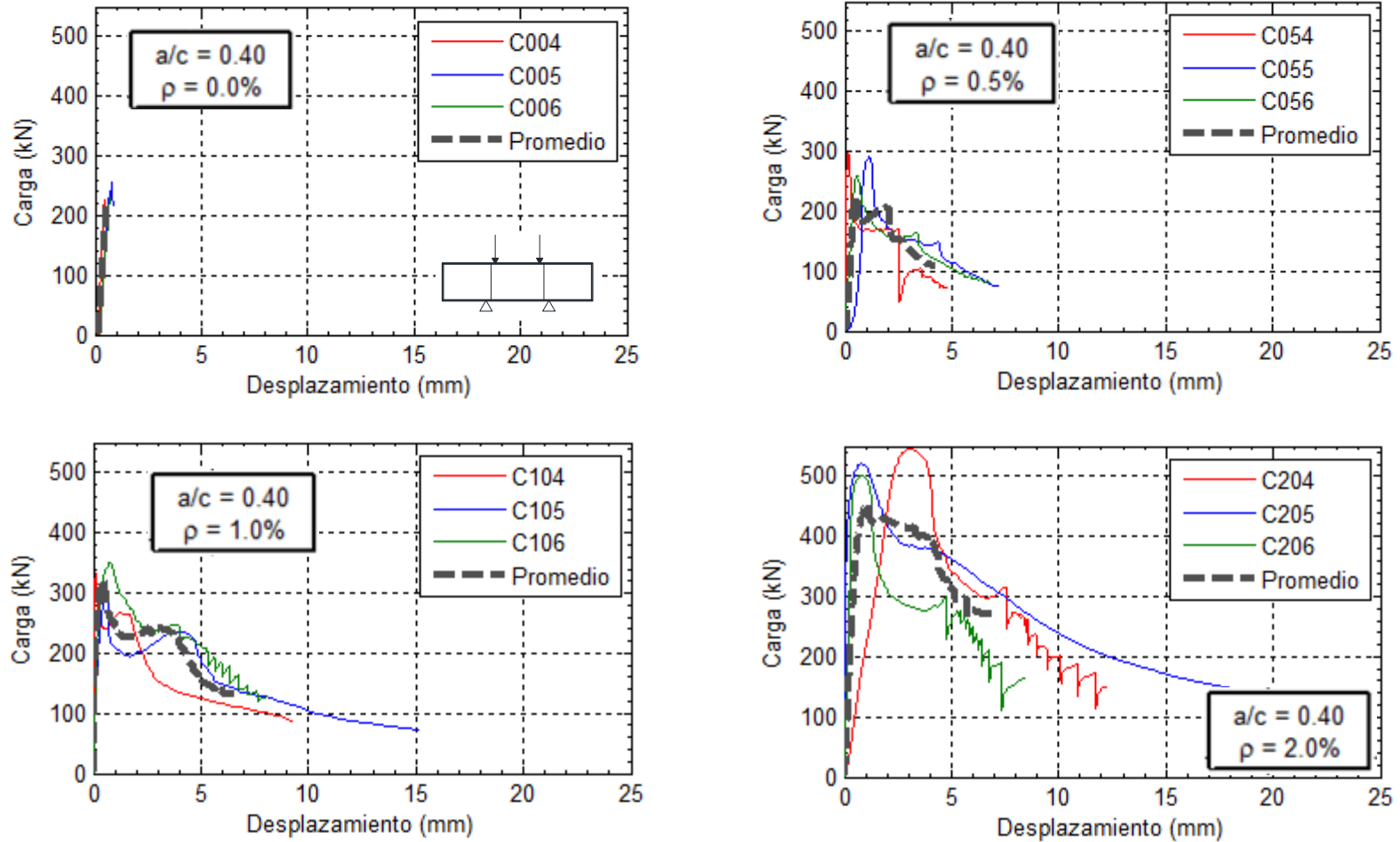
### 7.1.2 Serie A



Gráfica 27. Comportamiento en cortante de las probetas Serie A  
( $a/c=0.50$ )



### 7.1.3 Serie C



Gráfica 28. Comportamiento en cortante de las probetas Serie C  
(a/c=0.40)

## 7.2 RESISTENCIA AL CORTE

De manera similar a como se ha venido caracterizando mecánicamente el comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero, se procede a continuación al cálculo del esfuerzo máximo cortante, de acuerdo a:

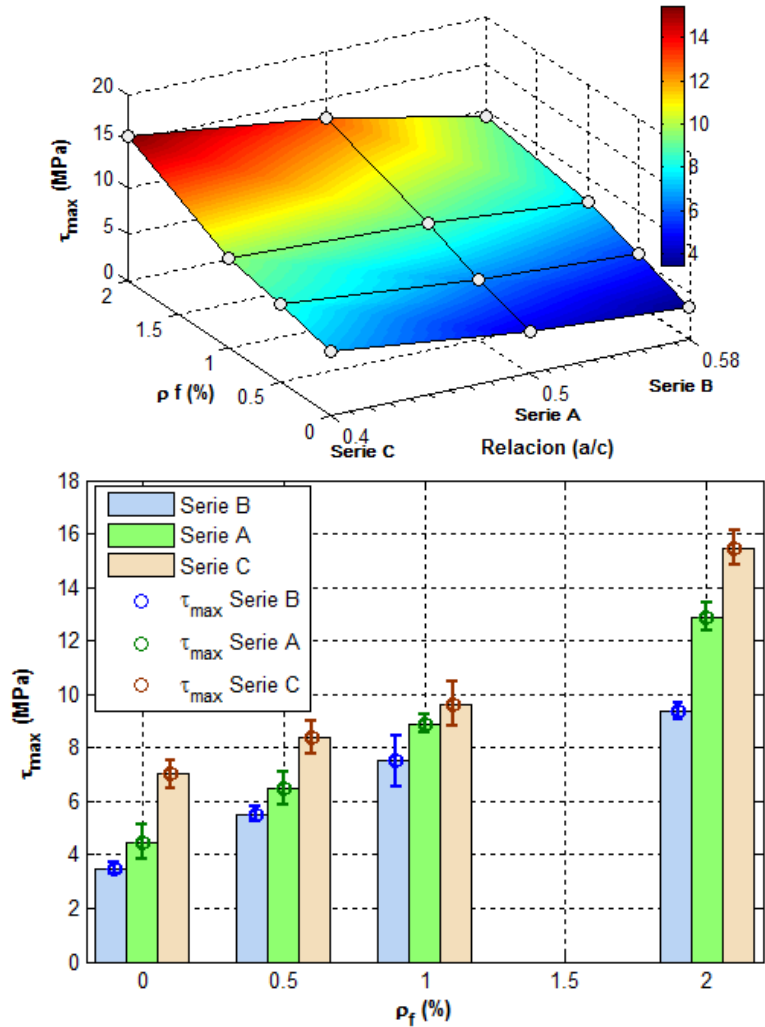
$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{2 * D_e * B_e} \quad \text{Ec. 7.1}$$

Donde  $\tau_{max}$  es el esfuerzo cortante máximo alcanzado,  $P_{max}$  la carga máxima registrada,  $D_e$  y  $B_e$  son la altura y ancho efectivo respectivamente de la sección transversal en las secciones transversales de la viga ranurada.

En la Tabla 34 se presenta el cálculo del esfuerzo máximo de corte basado en una sección transversal de  $140\text{mm}^2$  conforme a las ranuras realizadas indicadas en la Figura 27.

**Tabla 34. Esfuerzo máximo de corte**

Relación a/c	f'c prom MPa	$\rho_f$ %	Probeta	Edad	Pmax kN	$\tau_{max}$ MPa	$\tau_{max}$ prom MPa	CV
0,58	25,4	0,0	B00-4	28	121,12	3,58	3,49 ±0,23	7%
			B00-5	28	123,52	3,65		
			B00-6	28	108,77	3,22		
		0,5	B05-4	28	176,51	5,22	5,52 ±0,27	5%
			B05-5	28	194,45	5,75		
			B05-6	28	189,06	5,59		
		1,0	B10-4	28	254,37	7,53	7,51 ±0,95	13%
			B10-5	39	285,75	8,45		
			B10-6	39	221,71	6,56		
		2,0	B20-4	28	310,65	9,19	9,38 ±0,32	3%
			B20-5	28	310,75	9,19		
			B20-6	28	329,58	9,75		
0,5	27,5	0,0	A00-4	42	157,21	4,65	4,47 ±0,64	14%
			A00-5	42	127,32	3,77		
			A00-6	42	168,98	5,00		
		0,5	A05-4	42	216,71	6,41	6,48 ±0,64	10%
			A05-5	42	241,72	7,15		
			A05-6	42	198,38	5,87		
		1,0	A10-4	32	314,38	9,30	8,90 ±0,36	4%
			A10-5	32	291,83	8,63		
			A10-6	32	295,95	8,76		
		2,0	A20-4	32	415,28	12,29	12,90 ±0,53	4%
			A20-5	32	444,90	13,16		
			A20-6	32	447,94	13,25		
0,4	41,2	0,0	C00-4	49	225,64	6,68	7,01 ±0,50	7%
			C00-5	28	256,13	7,58		
			C00-6	28	228,68	6,77		
		0,5	C05-4	28	297,22	8,79	8,37 ±0,60	7%
			C05-5	28	291,92	8,64		
			C05-6	28	259,47	7,68		
		1,0	C10-4	30	331,84	9,82	9,64 ±0,81	8%
			C10-5	30	296,14	8,76		
			C10-6	30	349,58	10,34		
		2,0	C20-4	30	545,21	16,13	15,46 ±0,65	4%
			C20-5	30	521,09	15,42		
			C20-6	30	501,48	14,84		



Gráfica 29. Comparación de la resistencia a cortante de las muestras

En la Gráfica 29 se realiza la comparación entre series, y se puede deducir del análisis:

- En todas las muestras se verificó el incremento en la resistencia al cortante con la adición de fibras de acero.
- Igualmente se verificó el incremento de resistencia al concreto conforme el incremento en la resistencia a la compresión de la mezcla.

**Tabla 35. Incrementos de resistencia al corte en concreto SFRC**

Serie B		Serie A		Serie C	
f'c 25.4 Mpa – a/c 0.58		f'c 27.5 MPa– a/c 0.50		f'c 41.2 MPa– a/c 0.40	
$\tau_{max}$ (MPa)	$\tau/\tau_0$	$\tau_{max}$ (MPa)	$\tau/\tau_0$	$\tau_{max}$ (MPa)	$\tau/T_0$
3.49	1.00	4.47	1.00	7.01	1.00
5.52	1.58	6.48	1.45	8.37	1.19
7.51	2.16	8.90	1.99	9.64	1.38
9.38	2.69	12.90	2.88	15.46	2.21

Los incrementos valorados en la Tabla 35, con respecto a la mezcla sin fibra, estuvieron entre 1.19 y 2.88 veces para la inclusión de 0.5% y 2.0% de fibra metálica respectivamente.

### 7.3 TENACIDAD ABSOLUTA

Con el cálculo de las curvas de respuesta es posible determinar diferentes áreas bajo la curva hasta la carga máxima y hasta deflexiones fijas y comunes predeterminadas para realizar la comparación.

Los indicadores propuestos para medir el comportamiento en fractura en estas probetas, en las cuales el campo de esfuerzos se mantiene aproximadamente en corte puro, son:

1. Tenacidad Absoluta
2. Índices de tenacidad
3. Energía de fractura

La tenacidad absoluta ha sido propuesta y utilizada en la recomendación japonesa SF-4 (JSCE, 1984), (CARMONA y MARIPANGUI, 2007) y es definida como el área bajo la curva hasta cierto límite definido, expresado en N·m.

Los índices de tenacidad inspirados originalmente en el estándar ASTM C 1018 (ASTM, 2007) corresponden, por definición, al área bajo la curva hasta un desplazamiento  $\delta n$  dividida por el área bajo la curva hasta la carga máxima, así:

$$I_n = \frac{\text{Area bajo curva } P - \delta \text{ hasta } \delta n}{\text{Area bajo curva } P - \delta \text{ hasta } P_{\text{máx}}}$$

Las deflexiones adoptadas como referencia, y para efectos de comparación con el trabajo de (CARMONA y MARIPANGUI, 2007), son 2.5mm, 5 mm y 10 mm.

La estimación de la energía de fractura, cuya determinación constituye el principal alcance del trabajo, se detalla en el numeral 7.5.

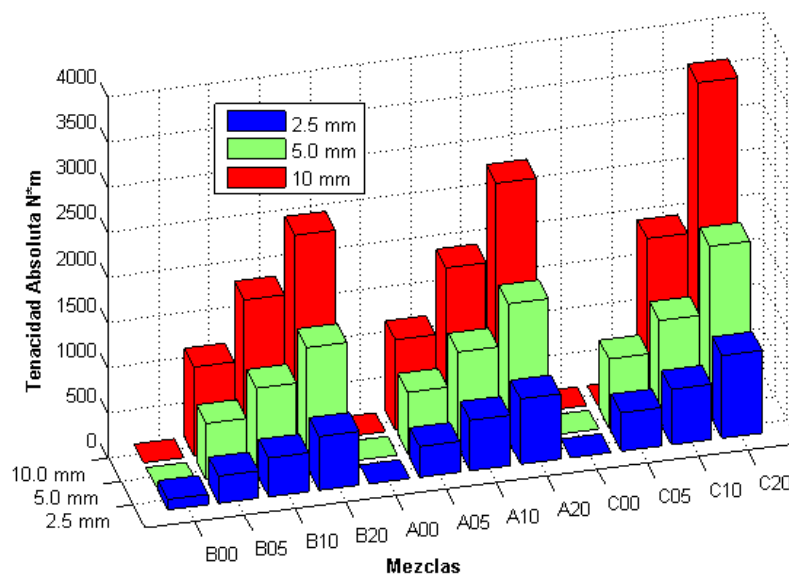
En la Tabla 36 se presenta el cálculo de la tenacidad absoluta, en aquellas casillas donde no se presenta un dato se debe a que las muestras no desarrollaron la capacidad para alcanzar esa deflexión, bien sea por fragilidad como sucede con la mayoría de muestras

sin fibra o bien porque el fenómeno exhibió distorsión, como por ejemplo cuando se presenta apoyo de una de las caras, lo cual pone a trabajar la muestra a aplastamiento.

Claramente se observa, Gráfica 30, el incremento en la tenacidad absoluta conforme aumenta la resistencia de la mezcla y el contenido de fibras de acero. Igualmente se puede inferir que el contraste es más obvio cuando se evalúa la tenacidad a una mayor deflexión, por ejemplo a los 10 mm, porque se hace más notoria la ganancia en respuesta de las muestras.

**Tabla 36. Cálculo de la tenacidad Absoluta**

MEZCLA	Relación w/c	f' <sub>c</sub> promedio (MPa)	ρ <sub>f</sub> (%)	TA <sub>2.5</sub> (N·m)	TA <sub>5</sub> (N·m)	TA <sub>10</sub> (N·m)
B	0.58	25.4	0.0	115.0		
			0.5	301.6	622.1	987.0
			1.0	428.3	940.7	1656.4
			2.0	594.3	1317.7	2299.5
A	0.50	27.5	0.0			
			0.5	339.6	678.8	1001.3
			1.0	557.6	1052.6	1723.1
			2.0	721.7	1513.3	2586.7
C	0.40	41.2	0.0			
			0.5	423.7	759.7	
			1.0	611.5	1112.5	1758.8
			2.0	912.5	1860.8	3409.5



**Gráfica 30. Comparación de la tenacidad absoluta promedio entre mezclas**

## 7.4 ÍNDICES DE TENACIDAD

Conforme lo expuesto en el anterior numeral, es posible realizar una comparación en la ganancia de ductilidad entre las probetas ensayadas en el presente proyecto y las probetas de la investigación de (CARMONA; y CABRERA, 2009).

En dicho trabajo se trabajaron 4 mezclas de concreto, de las cuales 3 son directamente comparables con el actual proyecto, cuyas características son:

Mezcla	HN	FRC-0.5-80	FRC-1.0-80
$\rho_f$ (%)	0	0.5	1.0
Relación de aspecto		80	80
f'c (MPa)	23	23	21

Las fibras utilizadas correspondían a Dramix 80/60 con características idénticas a las utilizadas por el presente proyecto. Como se ve, las mezclas son directamente comparables a parte de la serie B ensayada en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

En la Tabla 37 el cálculo de los índices adimensionales de tenacidad junto a su respectiva dispersión respecto al promedio.

**Tabla 37. Cálculo de los índices de tenacidad**

	$I_{2.5}$			$I_5$			$I_{10}$		
	valor	media	CV	valor	media	CV	valor	media	CV
B00-4	5.1			-			-		
B00-5				-			-		
B00-6	1.6	3.4	51%	-	-	0%	-	-	0%
B05-4	2.1			4.8			7.8		
B05-5	3.9			7.3			11.1		
B05-6	3.0	3.0	25%	6.4	6.2	16%	10.5	9.8	15%
B10-4	3.4			7.3			13.6		
B10-5	2.7			5.9			10.0		
B10-6	1.8	2.6	25%	4.1	5.8	23%	7.1	10.2	26%
B20-4	1.0			3.8			6.9		
B20-5	1.9			3.7			6.2		
B20-6	1.7	1.5	25%	3.2	3.5	8%	5.5	6.2	9%
A00-4	-			-			-		

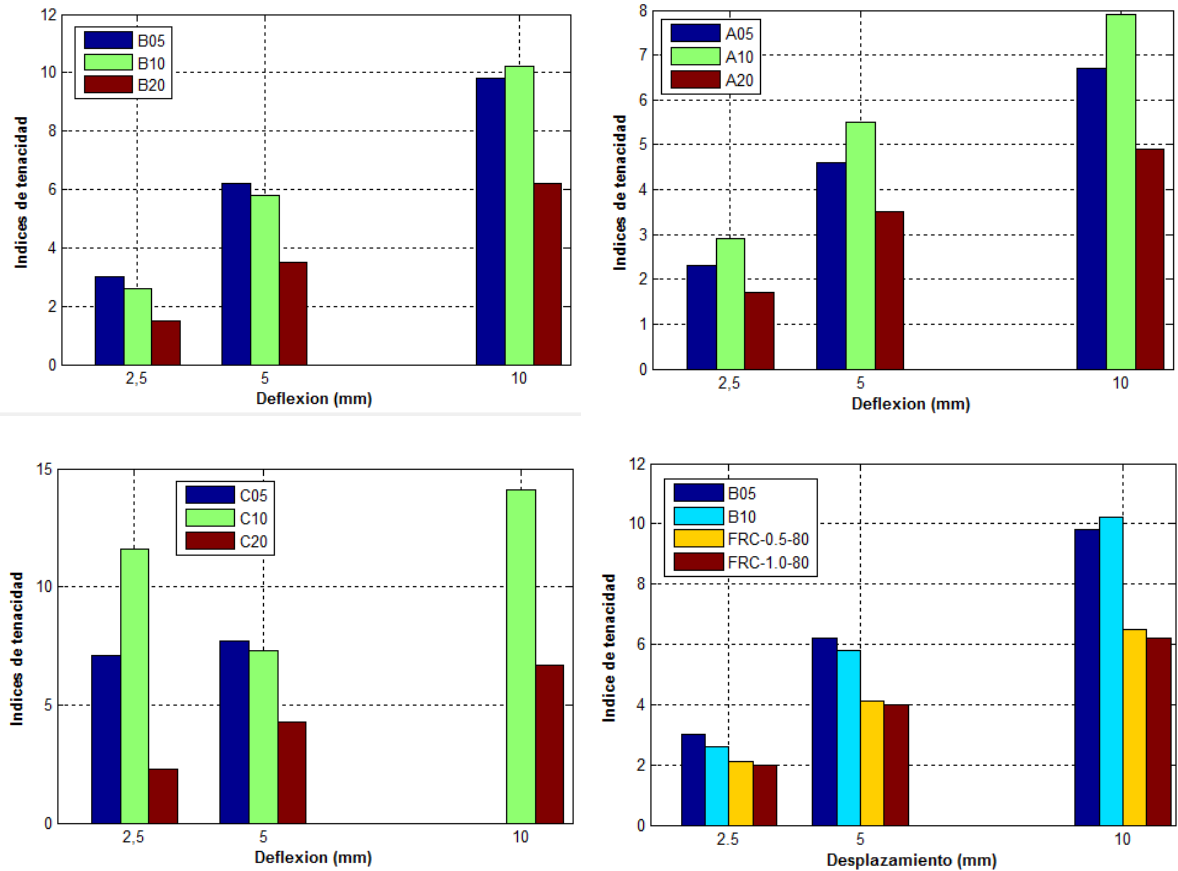


	I <sub>2.5</sub>			I <sub>5</sub>			I <sub>10</sub>		
	valor	media	CV	valor	media	CV	valor	media	CV
A00-5	-			-			-		
A00-6	-	-	0%	-	-	0%	-	-	0%
A05-4	1.7			3.6			5.6		
A05-5	2.8			5.1					
A05-6	2.4	2.3	20%	5.2	4.6	16%	7.8	6.7	16%
A10-4	2.5			5.0			8.0		
A10-5	3.5			6.6					
A10-6	2.7	2.9	14%	5.0	5.5	14%	7.9	7.9	0%
A20-4	1.0			2.7			4.9		
A20-5	2.0			3.9					
A20-6	2.1	1.7	28%	3.9	3.5	16%		4.9	0%
C00-4	-			-			-		
C00-5	-			-			-		
C00-6	-	-	0%	-	-	0%	-	-	0%
C05-4	12.8			-			-		
C05-5	3.2			6.1			-		
C05-6	5.2	7.1	58%	9.3	7.7	21%	-	-	0%
C10-4	27.3			43.3					
C10-5	4.2			8.7			14.1		
C10-6	3.2	11.6	96%	5.9	7.3	19%		14.1	0%
C20-4	0.7			1.9			3.3		
C20-5	3.2			5.9			10.1		
C20-6	3.0	2.3	50%	5.3	4.3	41%		6.7	51%

El análisis gráfico de los índices de tenacidad, así como la comparación con los ensayos de la investigación de (CARMONA y CABRERA, 2009), se presentan en la Gráfica 31.

Se pueden realizar las siguientes observaciones:

- Para todas las mezclas el índice de tenacidad, como es lógico, aumenta con la deflexión a la cual es medido.
- El índice de tenacidad aumenta proporcionalmente con el contenido de fibra, para una misma mezcla, o a lo sumo se mantiene, sin embargo para las mezclas con alto contenido de fibra 2% disminuye, la causa que se infiere para ello es que superado un contenido de fibra óptimo el efecto de ganancia en ductilidad desaparece. Ello se evidenció a lo largo de la investigación en los manuales y recomendaciones de los fabricantes de la fibra metálica (MACCAFERRI, 2007).



Gráfica 31. Índices de tenacidad cortante

En cuanto a la comparación con el trabajo de (CARMONA y CABRERA, 2009) se puede concluir que los índices de tenacidad comparables obtenidos con las cuantías del 0.5% y 1.0% son mayores en el presente trabajo. La causa probable es que la mezcla B tiene resistencias promedios de 26 MPa, mientras que las de (CARMONA y CABRERA, 2009) reporta resistencias de 23 MPa.

## 7.5 ENERGÍA DE FRACTURA MODO II

Para la determinación de la energía de fractura se tomó como referencia el trabajo de (BAŽANT y PRAT, 1988) quién, a partir del modelo de fisura cohesiva de Hillerborg, calculó energía de fractura mixta tipo II y tipo III.

Se calculó la energía de fractura como el trabajo de fractura producido hasta la carga máxima y hasta ciertas deflexiones establecidas dividido por el área inicial de ligamento, como se expresa a continuación:

$$G_{FII} = \frac{W_F}{A_{lig}} = \frac{W_F}{2(De - Be)} \quad \text{Ec. 7.2}$$

Se espera una variación considerable entre la energía de fractura obtenida en Modo I (flexión) y en Modo II (cortante en el plano). En ese orden de ideas, al final del capítulo se realizará la comparación de la energía de fractura modo I obtenida por los ensayos de flexión con los tipo II de los ensayos de corte. Desde la Tabla 38 hasta la Tabla 41 se presenta la evaluación de la energía de fractura en modo II. La energía de fractura obtenida hasta la carga máxima, como se puede ver en las gráficas carga - desplazamiento se produce después de superar el límite elástico. Se presenta igualmente los valores de energía de fractura en las deflexiones 2.5mm, 5 mm y 10mm, aclarando que no todas las probetas pueden desarrollar esa flecha. Es decir, a medida que aumenta el contenido de fibra se pueden alcanzar flechas mayores.

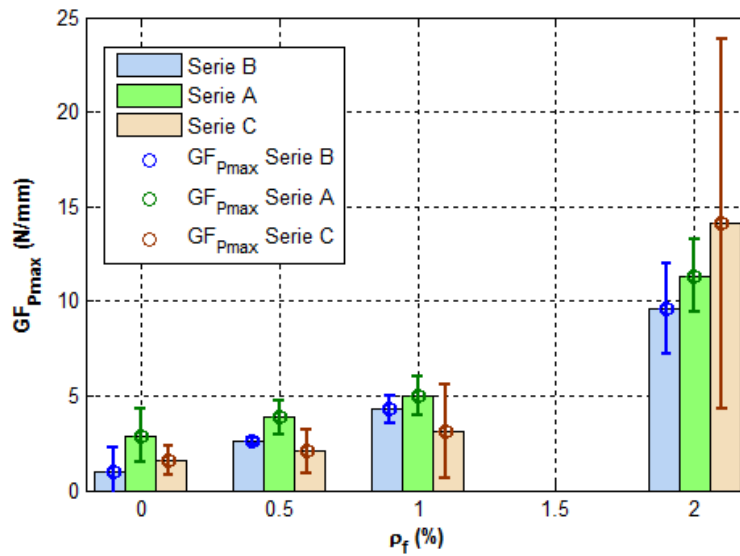
Para el análisis estadístico se realizaron las siguientes consideraciones:

- Como medida de dispersión de la muestra se calculó el coeficiente de variación (CV), el cual por definición resulta del cociente entre la desviación estándar de la muestra y la media aritmética del conjunto de tres probetas de la misma mezcla y cuantía.
- Se eliminaron del promedio y de la desviación estándar aquellos valores de energía de fractura calculados que arrojaran dispersiones mayores al 40%, como máximo una probeta por cada serie de 3.
- Dada la naturaleza del fenómeno, valores de dispersión por debajo del 20% son considerados, para el presente trabajo, aceptables, y por debajo del 10%, excelentes.

**Tabla 38. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta Pmax**

Probeta	GF <sub>II</sub> Pmax N/mm			CV	Probeta	GF <sub>II</sub> Pmax (N/mm)			CV
B00-4	0,365				A00-4	4,422			
B00-5	0,153				A00-5	1,690			
B00-6	2,449	0,989	±1,269	128%	A00-6	2,555	2,889	±1,396	48%
B05-4	2,831				A05-4	4,851			
B05-5	2,462				A05-5	3,651			
B05-6	2,493	2,595	±0,205	8%	A05-6	3,049	3,850	±0,917	24%
B10-4	3,461				A10-4	5,909			
B10-5	4,583				A10-5	3,880			
B10-6	4,763	4,269	±0,705	17%	A10-6	5,159	4,983	±1,026	21%
B20-4	7,539				A20-4	13,371			
B20-5	9,130				A20-5	10,997			
B20-6	12,243	9,637	±2,392	25%	A20-6	9,568	11,312	±1,921	17%

Probeta	GF <sub>II</sub> Pmax N/mm			CV
C00-4	0,835			
C00-5	2,413			
C00-6	1,476	1,575	± 0,793	50%
C05-4	0,893			
C05-5	3,133			
C05-6	2,117	2,048	±1,121	55%
C10-4	0,570			
C10-5	3,184			
C10-6	5,555	3,103	±2,493	80%
C20-4	25,333			
C20-5	9,084			
C20-6	7,848	14,088	±9,758	69%

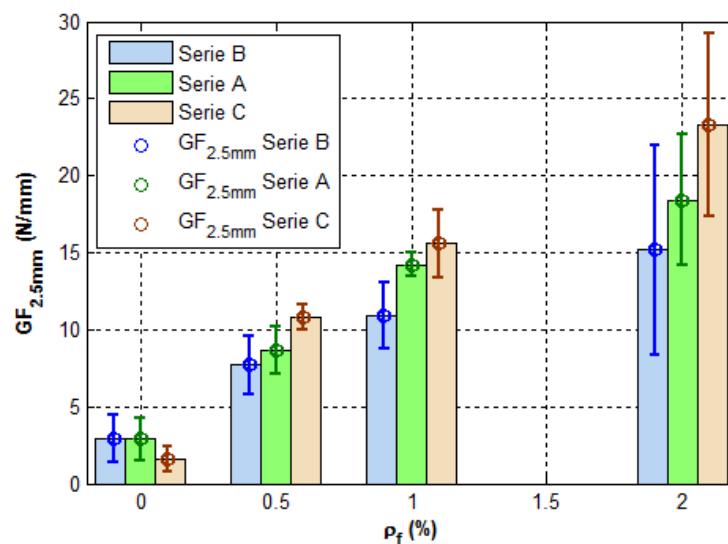


**Gráfica 32. Energía de fractura modo II hasta Pmax comparación entre series**

**Tabla 39. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta  $\delta = 2.5\text{mm}$**

Probeta	GF <sub>II</sub> 2,5 N/mm			CV	GF <sub>II</sub> 2,5 N/mm			CV
B00-4	1,853				A00-4	4,422		
B00-5	nd				A00-5	1,690		
B00-6	4,015	2,934	± 1,529	52%	A00-6	2,555	2,889	±1,396 48%
B05-4	5,932				A05-4	8,218		
B05-5	9,674				A05-5	10,366		
B05-6	7,473	7,693	±1,881	24%	A05-6	7,404	8,663	±1,530 0,18
B10-4	11,802				A10-4	15,054		
B10-5	12,479				A10-5	13,601		
B10-6	8,496	10,926	±2,131	20%	A10-6	14,016	14,223	±0,748 0,05
B20-4	7,565				A20-4	13,627		
B20-5	17,374				A20-5	21,670		
B20-6	20,546	15,162	±6,768	45%	A20-6	19,932	18,410	±4,232 0,23

Probeta	GF <sub>II</sub> 2,5 N/mm			CV
C00-4	0,835			
C00-5	2,413			
C00-6	1,476	1,575	± 0,793	50%
C05-4	11,399			
C05-5	9,924			
C05-6	11,106	10,810	±0,781	7%
C10-4	15,590			
C10-5	13,399			
C10-6	17,810	15,600	±2,205	14%
C20-4	17,052			
C20-5	28,944			
C20-6	23,835	23,277	±5,965	26%

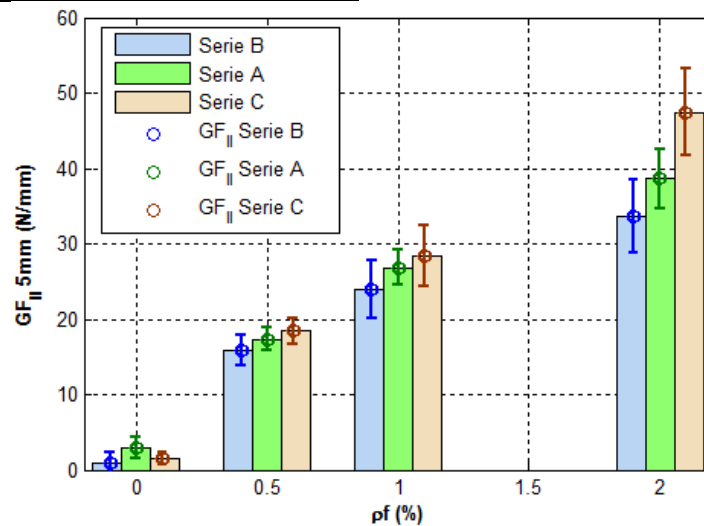


**Gráfica 33. Energía de fractura modo II hasta  $\delta = 2.5\text{mm}$  comparación series**

**Tabla 40. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta  $\delta=5$  mm**

Probeta	GF <sub>II5</sub> N/mm	CV	Probeta	GF <sub>II5</sub> N/mm	CV
B00-4	0,365		A00-4	4,422	
B00-5	0,153		A00-5	1,690	
B00-6	2,449	0,989 ±1,269 128%	A00-6	2,555	2,889 ±1,396 48%
B05-4	13,709		A05-4	17,476	
B05-5	17,911		A05-5	18,741	
B05-6	15,991	15,871 ±2,103 13%	A05-6	15,732	17,316 ±1,511 9%
B10-4	25,406		A10-4	29,458	
B10-5	26,954		A10-5	25,521	
B10-6	19,632	23,997 ±3,859 16%	A10-6	25,575	26,851 ±2,258 8%
B20-4	28,870		A20-4	35,862	
B20-5	33,352		A20-5	43,038	
B20-6	38,624	33,615 ±4,882 15%	A20-6	36,913	38,604 ±3,875 10%

Probeta	GF <sub>II5</sub> N/mm	CV
C00-4	0,835	
C00-5	2,413	
C00-6	1,476	1,575 ±0,793 -
C05-4	11,399	
C05-5	19,028	
C05-6	19,730	16,719 ±4,621 28%
C10-4	24,711	
C10-5	27,687	
C10-6	32,746	28,381 ±4,062 14%
C20-4	47,490	
C20-5	53,157	
C20-6	41,759	47,469 ±5,699 12%

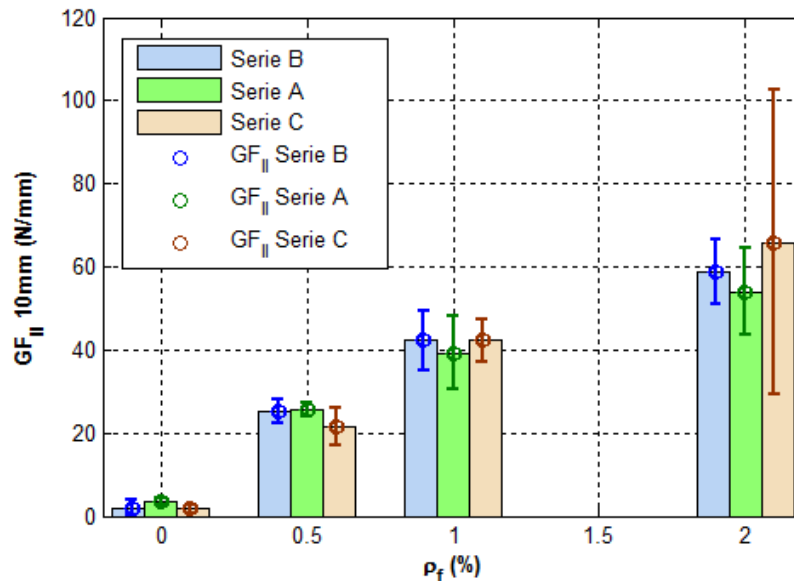


**Gráfica 34. Energía de fractura modo II hasta  $\delta =5$ mm comparación series**

**Tabla 41. Evaluación de la energía de fractura modo II hasta  $\delta=10\text{mm}$**

Probeta	$GF_{II}$ 10 N/mm	CV	Probeta	$GF_{II}$ 10 N/mm	CV
B00-4	0,365		A00-4	4,422	
B00-5	0,153		A00-5	1,690	
B00-6	2,449	0,989 $\pm 1,269$ 128%	A00-6	2,555	2,889 $\pm 1,396$ 48%
B05-4	22,048		A05-4	27,250	
B05-5	27,212		A05-5		
B05-6	26,272	25,177 $\pm 2,751$ 11%	A05-6	23,836	25,543 $\pm 2,414$ 9%
B10-4	47,104		A10-4	47,144	
B10-5	45,665		A10-5		
B10-6	33,996	42,255 $\pm 7,189$ 17%	A10-6	40,767	43,955 $\pm 4,510$ 10%
B20-4	51,922		A20-4	65,987	
B20-5	56,812		A20-5		
B20-6	67,250	58,661 $\pm 7,830$ 13%	A20-6	65,987	0%

Probeta	$GF_{II}$ 10 N/mm	CV
C00-4	0,835	
C00-5	2,413	
C00-6	1,476	1,575 $\pm 0,793$ 50%
C05-4	11,399	
C05-5	9,924	
C05-6	11,106	10,810 $\pm 0,781$ 7%
C10-4	15,590	
C10-5	13,399	
C10-6	17,810	15,600 $\pm 2,205$ 14%
C20-4	82,536	
C20-5	91,420	
C20-6	23,835	65,931 $\pm 36,725$ 56%



**Gráfica 35. Energía de fractura modo II hasta  $\delta=10\text{mm}$  comparación series**

Igualmente se estableció la variación de la energía de fractura conforme aumenta la adición de fibras, es decir la comparación contra las muestras sin fibra, en este caso se denomina  $GF_{II} / GF_{II0}$ , el cual se puede visualizar en la Tabla 42.

**Tabla 42. Evaluación de la energía de fractura modo II – Promedios**

Relación a/c	MEZCLA	$\rho_f$ (%)	$GF_{II}$ N/mm	$GF_{II} p_{max} / GF_0$	$GF_{II 2,5}$ N/mm	$GF_{II 2,5} / GF_0$	$GF_{II 5}$ (N/mm)	$GF_{II 5} / GF_0$	$GF_{II 10}$ N/mm	$GF_{II 10} / GF_0$
0,580	B	0,0	0,989	1,0	2,934	1,0	-	-	-	-
		0,5	2,595	2,6	7,693	2,6	15,87	1,0	25	1,0
		1,0	4,269	4,3	10,926	3,7	24,00	1,5	42	1,7
		2,0	9,637	9,7	15,162	5,2	33,62	2,1	59	2,3
0,500	A	0,0	2,889	1,0	-	-	-	-	-	-
		0,5	3,850	1,3	8,663	1,0	17,32	1,0	26	1,0
		1,0	4,983	1,7	14,223	1,6	26,85	1,6	44	1,7
		2,0	11,312	3,9	18,410	2,1	38,60	2,2	66	2,6
0,400	C	0,0	1,575	1,0	-	-	-	-	-	-
		0,5	2,048	1,3	10,810	1,0	16,72	1,0	-	-
		1,0	3,103	2,0	15,600	1,4	28,38	1,7	16	1,0
		2,0	14,088	8,9	23,277	2,2	47,47	2,8	66	4,2

Nótese que la evaluación se puede hacer para todas las muestras hasta la carga máxima y en el caso de la mezcla B hasta la deflexión de 2.5 mm, en las demás no es posible debido a que usualmente las probetas sin fibra no pueden alcanzar la deflexión de 2.5mm, pues exhiben un comportamiento frágil.

Dentro de las investigaciones consultadas no se encontró energía de fractura modo II comparable con los concretos y cuantías de fibra utilizadas en el presente proyecto. Sin embargo la comparación se efectuó a través de los índices de tenacidad.

En el capítulo 8 se comparan los valores de energía de fractura a cortante con los otros ensayos realizados de flexión y tracción indirecta.



## 8 COMPARACIÓN DE ENERGÍA DE FRACTURA ENTRE ENSAYOS

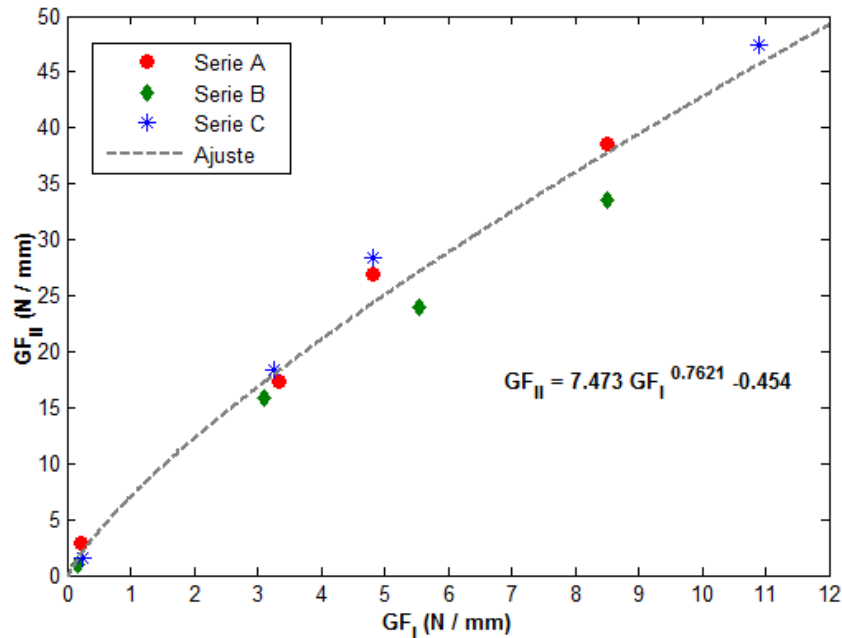
Se presenta a continuación la comparación entre los modos de fractura tipo I y II obtenidos con los ensayos de flexión y corte, presentados y discutidos en los capítulos 5 y 7 respectivamente. Como punto de comparación se tomó el trabajo de fractura medido hasta la flecha de 5mm, ello se debe a que en el caso del ensayo de cortante a la deflexión de 10mm se presentó mayor dispersión, debido a fenómenos de aplastamiento en los apoyos y a que algunas viguetas se apoyan o fracturan prematuramente.

En la Tabla 43 se presentan las energías de fractura obtenidas, los valores entre paréntesis representan la desviación estándar de la muestra y se presenta también la relación entre los modos II y I. Excepto el valor obtenido para A00 la relación entre modos prevalece de manera consistente entre 4,0 y 6,2 veces.

Tabla 43. Comparación entre los modos de fractura I y II

Serie	Relación a/c	$\rho_f$ %	$GF_{I\ 5mm}$ N/mm Flexión	$GF_{II\ 5mm}$ N/mm Cortante	$GF_{II} / GF_I$
B00	0,58	0,0	0,165 ( $\pm 0,006$ )	0,989 ( $\pm 1,269$ )	6,0
B05		0,5	3,091 ( $\pm 0,259$ )	15,871 ( $\pm 2,103$ )	5,1
B10		1,0	5,558 ( $\pm 1,637$ )	23,997 ( $\pm 3,859$ )	4,3
B20		2,0	8,503 ( $\pm 1,004$ )	33,615 ( $\pm 4,882$ )	4,0
A00	0,50	0,0	0,218 ( $\pm 0,003$ )	2,889 ( $\pm 1,396$ )	13,3
A05		0,5	3,343 ( $\pm 0,657$ )	17,316 ( $\pm 1,511$ )	5,2
A10		1,0	4,829 ( $\pm 1,086$ )	26,851 ( $\pm 2,258$ )	5,6
A20		2,0	8,508 ( $\pm 1,015$ )	38,604 ( $\pm 3,875$ )	4,5
C00	0,40	0,0	0,253 ( $\pm 0,03$ )	1,575 ( $\pm 0,793$ )	6,2
C05		0,5	3,264 ( $\pm 0,522$ )	18,392 ( $\pm 1,745$ )	5,6
C10		1,0	4,829 ( $\pm 0,495$ )	28,381 ( $\pm 4,062$ )	5,9
C20		2,0	10,885 ( $\pm 2,303$ )	47,469 ( $\pm 5,699$ )	4,4

En la Gráfica 36 se visualiza la comparación entre modos de fractura I y II y se presenta la respectiva correlación con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,976.



**Gráfica 36. Comparación entre energía de fractura Modo I y Modo II**

De igual manera se realizó la comparación entre los valores de energía de fractura modo I obtenidos a partir de dos ensayos independientes: flexión sobre viguetas y tracción indirecta sobre cilindros de concreto. Los resultados se presentaron y discutieron en los numerales 5.5 y 6.3, se fijó como punto de comparación el trabajo de fractura medido hasta una deflexión de 5mm.

En la Tabla 44 se presentan los valores de energía de fractura obtenidos, entre paréntesis los valores de desviación estándar de la muestra y el valor de comparación  $GF_{It}$  y  $GF_{Ib}$  representa la relación entre la energía de fractura a tracción indirecta y a flexión.

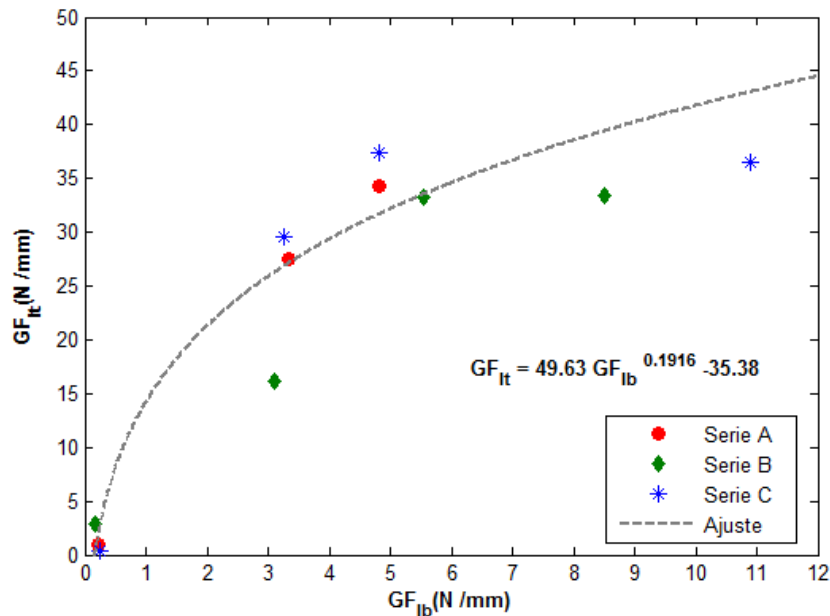
**Tabla 44. Comparación entre los modos de fractura I - flexión y tracción indirecta**

Serie	Relación a/c	$\rho_f$ %	$GF_{I 5mm}$ N/mm Flexión	$GF_{I 5mm}$ N/mm Tracción	$GF_{It} / GF_{Ib}$
B00	0,58	0,0	0,165 ( $\pm 0,006$ )	2,844 ( $\pm 1,598$ )	17,2
B05		0,5	3,091 ( $\pm 0,259$ )	16,138 ( $\pm 4,73$ )	5,2
B10		1,0	5,558 ( $\pm 1,637$ )	33,23 ( $\pm 4,393$ )	6,0
B20		2,0	8,503 ( $\pm 1,004$ )	33,476 ( $\pm 3,841$ )	3,9
A00	0,50	0,0	0,218 ( $\pm 0,003$ )	0,973 ( $\pm 0,234$ )	4,5
A05		0,5	3,343 ( $\pm 0,657$ )	27,541 ( $\pm 2,857$ )	8,2
A10		1,0	4,829 ( $\pm 1,086$ )	34,281 ( $\pm 2,444$ )	7,1
A20		2,0	8,508 ( $\pm 1,015$ )	50,919 ( $\pm 7,12$ )	6,0

Serie	Relación a/c	$\rho_f$ %	$GF_{I,5mm}$ N/mm Flexión	$GF_{I,5mm}$ N/mm Tracción	$GF_{I,t} / GF_{I,b}$
C00	0,40	0,0	0,253 ( $\pm 0,03$ )	0,394 ( $\pm 0,101$ )	1,6
C05		0,5	3,264 ( $\pm 0,522$ )	29,61 ( $\pm 0,939$ )	9,1
C10		1,0	4,829 ( $\pm 0,495$ )	37,323 ( $\pm 6,446$ )	7,7
C20		2,0	10,885 ( $\pm 2,303$ )	36,489 ( $\pm 3,857$ )	3,4

Excepto el valor obtenido para la serie B00 la relación obtenida está entre 1,6 y 9,1 veces. De la comparación se infiere que aunque se trata del mismo modo de fractura en apertura, el tipo I, en los ensayos a tracción indirecta se presentan fenómenos de aplastamiento, los cuales sobrestiman el valor de energía. En este punto vale recordar que el ensayo normalizado más ampliamente aceptado para la determinación de la energía de fractura es el de flexión bajo carga central, o de viga tres apoyos (RILEM, 2002)

En la Gráfica 37 se presenta la comparación entre la energía de fractura a flexión y tracción indirecta. Se obtiene y presenta una función entre los valores promedio obtenidos, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.8739.



Gráfica 37. Comparación entre energía de fractura Modo I a flexión y tracción indirecta

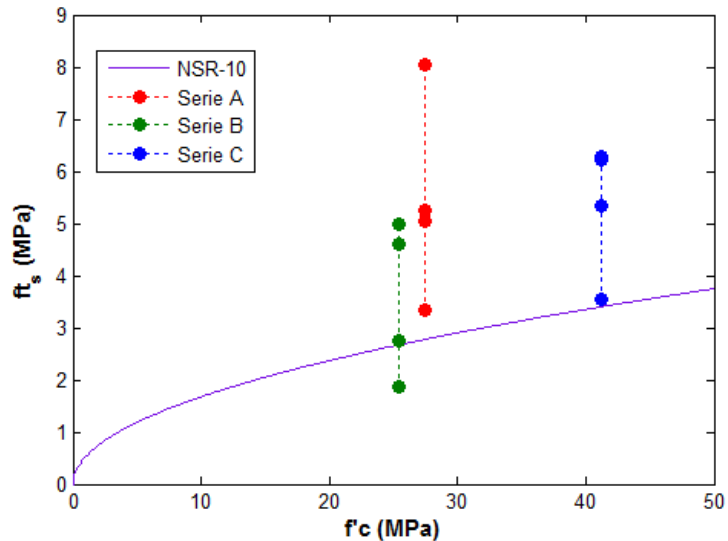
## 8.1 COMPARACIÓN CON LAS RESISTENCIAS OBTENIDAS

Se presenta a continuación la comparación entre la resistencia promedio a compresión y a tracción indirecta, obtenidas en los numerales 4 y 6.2. Los valores de compresión de referencia son los obtenidos para los especímenes de concreto simple. En la Gráfica 38 se presenta la comparación con respecto al criterio para concreto de peso normal presentado en el reglamento NSR-10 (AIS, 2010) en el numeral CR.8.6.1 como:

$$f'_{ct} \approx 0.56 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. 8.1}$$

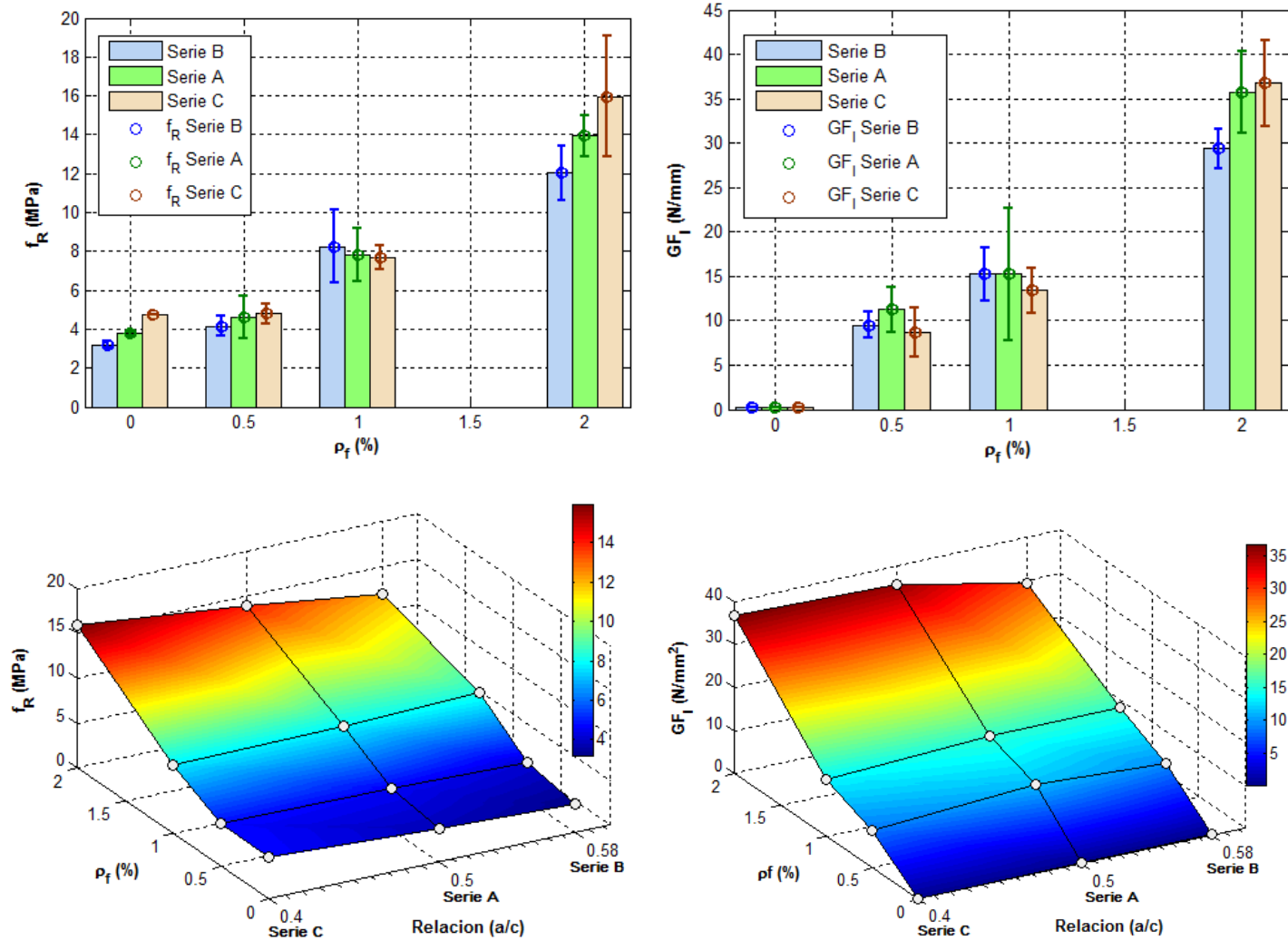
Donde  $f'_{ct}$  es la resistencia promedio a la tracción por hendimiento a los 28 días y  $f'_c$  la resistencia promedio a la compresión de las probetas. En el presente trabajo  $f'_{ct} = f_{ts}$ .

En la Gráfica 38 puede apreciarse que dicha relación se aproxima para las muestras de concreto simple, y se aleja del comportamiento en las mezclas con adición de fibra por la ganancia en resistencia a la tensión que adquieren las muestras.

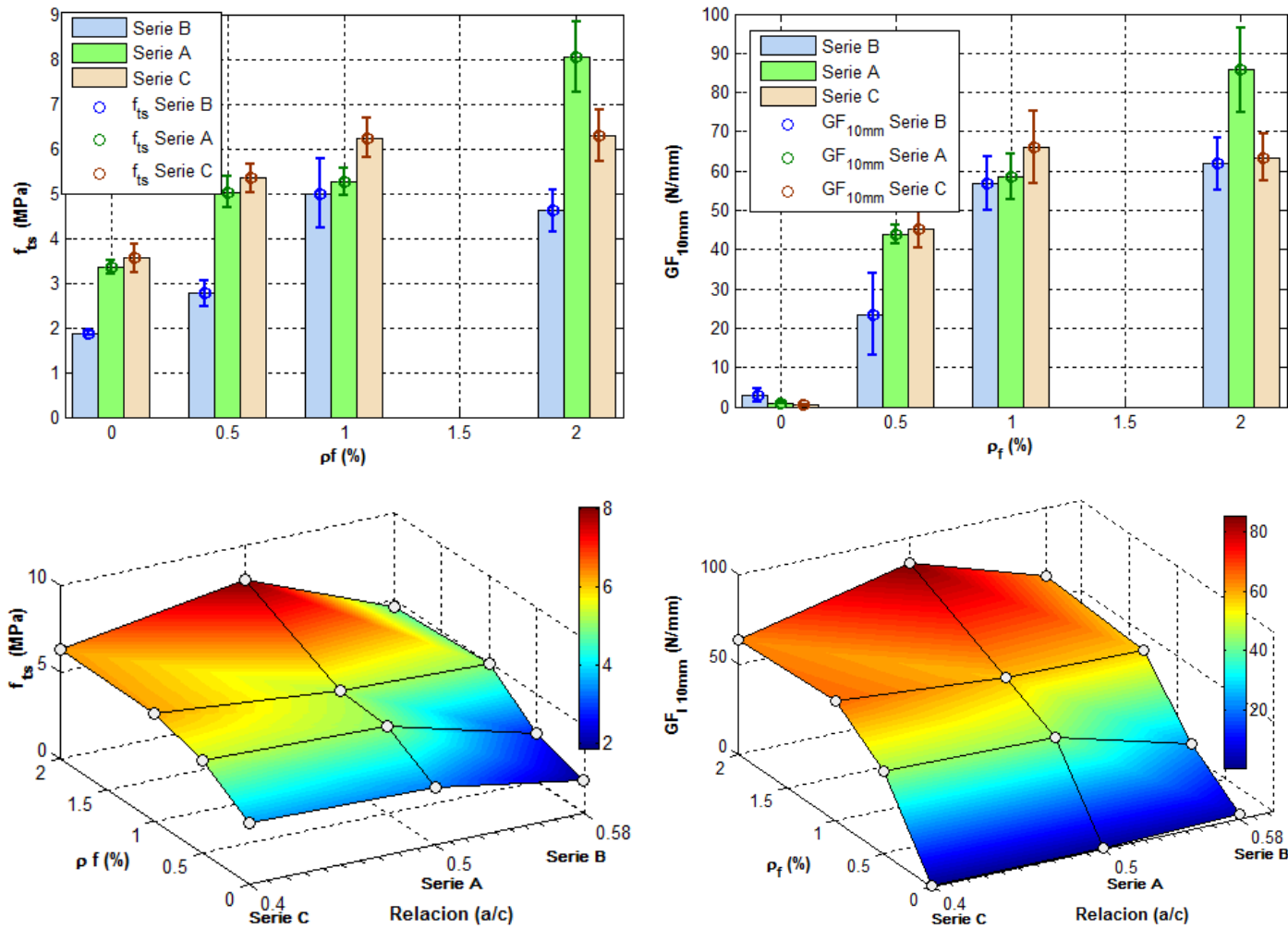


Gráfica 38. Comparación entre resistencia a compresión y tracción

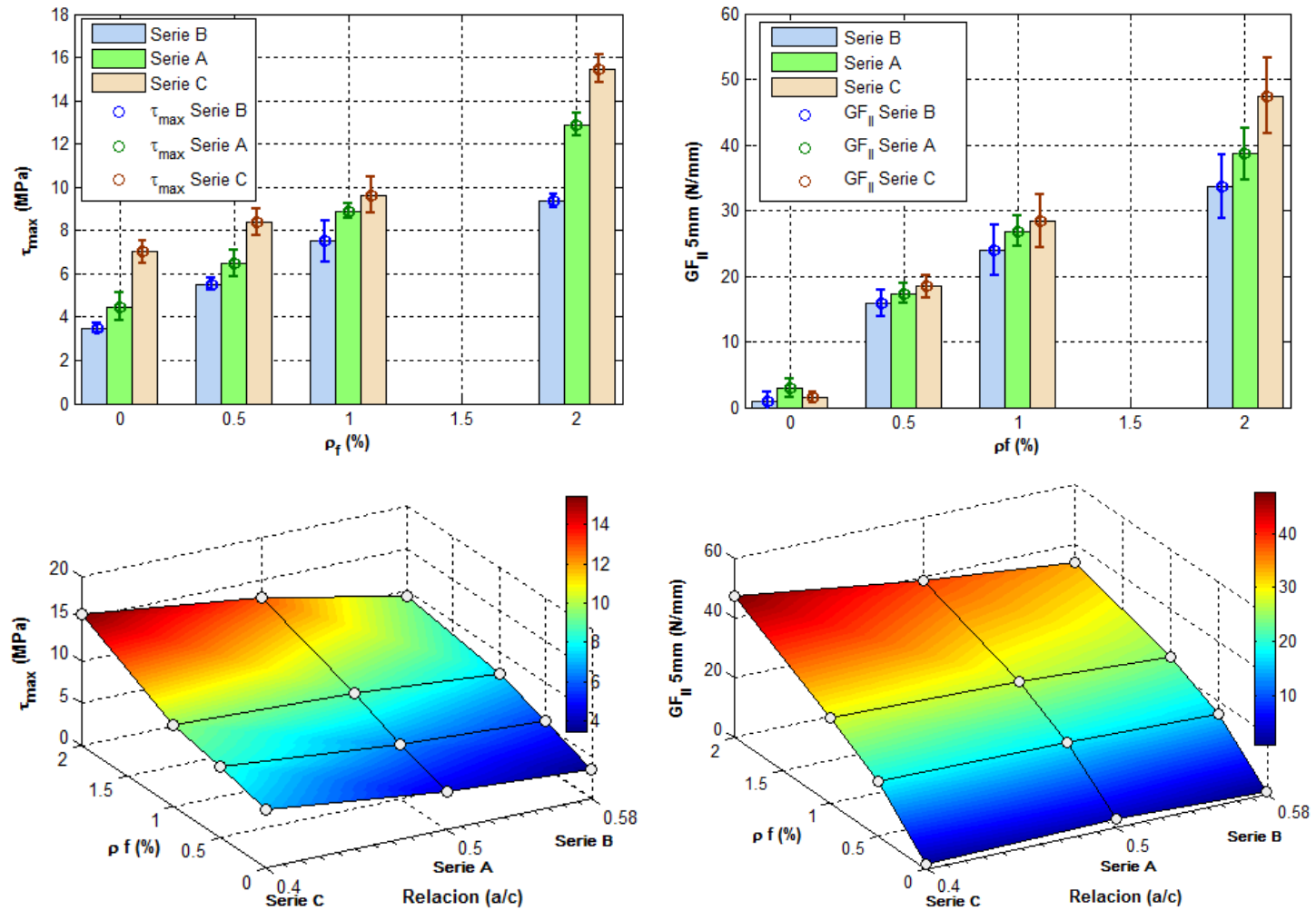
De la Gráfica 39 a la Gráfica 41 se ilustra la comparación entre incrementos de resistencia y de energía de fractura obtenidos en los capítulos 5 a 7.



Gráfica 39. Comparación entre resistencia a la flexión y energía de fractura modo I



Gráfica 40. Comparación entre resistencia a la tracción indirecta y energía de fractura



Gráfica 41. Comparación entre resistencia al cortante y energía de fractura

## 9 CONCLUSIONES

- Se obtuvieron, de acuerdo con el alcance, valores de energía de fractura para todos los ensayos propuestos: compresión, flexión, tracción indirecta y cortante. La fractura en modo I (esfuerzos normales perpendiculares a la apertura de fisura) para el caso de los ensayos de flexión y tracción indirecta, en modo II (cizallamiento, esfuerzos paralelos a la fisura) para el caso de los ensayos de cortante y en modo mixto (combinación de modos apertura, cizallamiento y desgarre) para el caso de la fractura a compresión.
- Se obtuvieron y compararon, además, parámetros mecánicos adicionales para cuantificar la mejora en desempeño de las mezclas enriquecidas como lo son: resistencia a la compresión a los 28 días  $f'_c$ , resistencia a la tracción indirecta  $ft_s$ , módulo de rotura a la flexión  $f_R$  y esfuerzo máximo cortante  $\tau$ .
- Dada la variedad de modelos propuestos por la mecánica de fractura para el concreto, y teniendo en cuenta los requerimientos de montajes y ensayos que cada uno de ellos requiere, así como también buscando utilizar óptimamente los equipos disponibles en el laboratorio de estructuras y materiales de la Escuela, se optó por utilizar el modelo de fractura de fisura cohesiva MFC, el cual es un modelo de daño no lineal ampliamente documentado y utilizado. Sin embargo se hace la salvedad de que existen modelos adicionales que encuentran parámetros de fractura adicionales a la Energía de Fractura, lo cual aunque escapa del alcance del presente trabajo y que bien pudiera ser objeto de investigaciones adicionales, como se propone y detalla en el numeral 9.5.
- El aumento de energía de fractura en el concreto reforzado con fibras es mucho mayor que el aumento en todas las demás propiedades mecánicas que fueron medidas en este trabajo; en términos generales, para todos los fenómenos los incrementos en energía de fractura con respecto al concreto simple es entre 1.5 y 70 veces, dependiendo el fenómeno en que se midió.
- Se determinó para todos los ensayos el valor de energía de fractura hasta la carga máxima, y donde existió, se midió la respuesta post-pico de la probeta hasta donde fue posible, en la rama descendente de las curvas carga – flecha o esfuerzo deformación, con el fin de evaluar la mejora en desempeño a la tenacidad con la adición del microrefuerzo. Se presentó en general valores de dispersión de moderados a elevados en cada uno de los cuatro fenómenos estudiados. Dichas dispersiones son coherentes con lo observado en la bibliografía consultada.



## 9.1 CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN COMPRESIÓN

- Con la incorporación de las fibras el aumento en la energía de fractura antes de alcanzar la carga pico es moderado, medido por el parámetro  $GF_{\epsilon c}$ , mientras que las mayores mejoras en desempeño se producen en la respuesta post-pico, medida por el parámetro de energía  $GF_{\epsilon u}$ . Se presume que las fibras de acero empiezan a trabajar entre el límite elástico y el límite plástico del material, probablemente cuando empiezan a producirse las fisuras, antes de lo cual no aportan mejoras en el desempeño.
- Se mostró de manera consistente que la energía total de fractura en compresión  $GF^c$  para las mezclas con adición de 0.5% de fibra metálica es aproximadamente el doble (1.87 – 2.26) que la obtenida en concreto simple.
- La energía total de fractura en compresión  $GF^c$ , aumenta con la adición de fibras de acero, y la resistencia del concreto. Las series probetas A00 y A05 niegan esa condición pero es debido a que en estas dos series de cilindros fallados a compresión no fue posible medir adecuadamente la respuesta post-pico, lo cual obligó a la mejora en el ensayo para el resto de la investigación.

## 9.2 CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN FLEXIÓN

- En todas las series se incrementa la energía de fractura con la adición de fibras de acero.
- Los mayores incrementos se observaron en la mezcla con baja resistencia.
- Al aumentar la resistencia de la mezcla, ésta empieza a tornarse frágil y la adición de fibras no reporta la misma mejora en ductilidad. Se observa que entre las mezclas B y A hay incrementos entre el 18 y 32% de tenacidad, mientras que entre B y C hay pérdidas de tenacidad de hasta el 23%, en ambos casos con el doble de adición de fibra con respecto a la mezcla anterior.

## 9.3 CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN TRACCIÓN INDIRECTA

- Puede afirmarse que el ensayo de tracción indirecta no corresponde a un modo puro de tensión, y se observó en los ensayos que después de alcanzada la curva pico y durante el tramo descendente de la curva de ablandamiento empezaban a presentarse comportamientos de aplastamiento de la muestra, momento en el cual era más apropiado suspender el ensayo. Se presume que es más apropiado realizar ensayo de tensión uniaxial para caracterizar apropiadamente el tramo descendente de la curva de ablandamiento.

#### 9.4 CONCLUSIONES SOBRE LA FRACTURA EN CORTANTE

- Puede afirmarse que el ensayo de cortante puro basado en la norma japonesa JF-6 (JSCE, 2002) utilizado en la presente investigación es uno de los más apropiados para caracterizar el fenómeno, dada la evidencia que apunta que los demás ensayos utilizados exhiben en realidad modos mixtos de fractura difícilmente depurables.

#### 9.5 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

- Se recomienda completar las series de ensayos para todos los fenómenos estudiados y en las mismas condiciones experimentales del presente trabajo para por lo menos una cuantía adicional volumétrica de 1.5%, con la misma fibra y las mismas tres mezclas utilizadas. Ello se motiva en el hecho que entre 1.0% y 2.0% de cuantía volumétrica de fibra se presentó un gran salto en el comportamiento.
- Se recomienda la realización de trabajos adicionales específicos para cada uno de los ensayos realizados en el presente trabajo, con las siguientes propuestas y justificaciones:
  - Ensayos a flexión, se recomienda fallar por lo menos 6 probetas por cada mezcla para cumplir la recomendación del ensayo dada en RILEM TC-162 para reducir la dispersión del promedio, es deseable la obtención de coeficientes de variación menores al 10% como control de desviación del valor medio de energía de fractura.
  - Ensayos a flexión, se recomienda la utilización de deformímetro tipo pinza con un rango de apertura mínimo de 25mm y precisión 1/100 mm, lo cual estará más acorde con los últimos trabajos de energía de fractura en los cuales se registra directamente curvas carga – apertura en la boca de fisura P-CMOD en detrimento de las curvas carga – flecha P- $\delta$  que fueron las utilizadas en el presente trabajo, la razón de la propuesta radica en que con las curvas P-CMOD se pueden evaluar modelos de fractura diferentes al modelo de fisura cohesiva y dado que la evidencia apunta que la apertura en la fisura no es equivalente a la flecha en el centro de luz debido a la distribución interna de esfuerzos en las probetas de concreto (ELICES et al., 1992a) Se considera más preciso la medición directa de la apertura de fisura.
  - Se recomienda la utilización de máquinas de ensayo provistas de servocontrol, lo cual evita la detención del ensayo ante descensos súbitos de carga, lo cual ocurrió principalmente en los ensayos sobre las probetas frágiles, concreto

simple principalmente. Ello obliga a reiniciar el ensayo, constituyéndose en fuente de error para la toma de datos y para su análisis.

- Para el caso de los ensayos realizados sobre vigas, a flexión o a corte, se recomienda en futuras investigaciones la realización de una compensación de peso mediante el montaje de resortes o de elásticos que soporten las dos mitades de la viga una vez fracturada, con lo cual se busca prevenir la falla prematura de las vigas bajo su propio peso, que impide la toma de datos postpico en el registro de la curva de descenso. Propuestas de dicho montaje pueden visualizarse en los trabajos de (ELICES et al., 1992a, CIFUENTES H. , 2009)
- Con la implementación de un montaje con compensación de peso es posible registrar más datos en el tramo descendente de la curva de ablandamiento, sin embargo puede continuar requiriéndose el ajuste de cola CITAR, bien sea porque la probetas empiecen a registrar saltos o comportamientos anómalos, o por la duración del ensayo en las mezclas con fibra, el cual puede demorar más de 2 horas, o bien porque se alcanza la máxima carrera en los deformímetro.
- Se propone la realización de una investigación de energía de fractura con el Modelo de Fractura Doble G (KUMAR y BARAI, 2011) el cual ofrece la posibilidad de diferenciar la porción de energía crítica o estable de la porción inestable, que es la que aumenta la dispersión de los resultados, siendo además la primera energía, la cual ocurre al inicio de la apertura, la que reviste mayor interés para los diseñadores.
- Se propone la realización de una investigación de fractura modo I utilizando el ensayo de tensión compacta (JENQ y SHAH, 1985), por cuanto se ha determinado que tiene resultados comparables y consistentes con la flexión en vigas en tres puntos (RILEM, 2002) y tiene la ventaja de que el menor tamaño de las probetas facilitaría la ejecución y los costos de la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. Farmington Hills, Michigan: ACI, 1991. 38 p. ACI 211.1-91.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete*. Farmington Hills, Michigan: ACI, 2008. 16 p. ACI 544-3R 08.

ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. *NSR-10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá, Colombia: AIS, 2010.

AKAZAWA, T. *Tension test method for concrete*. En: International Association of testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Noviembre, 1953. Vol. 16, p. 11

ALMANSA, Eduardo Moreno y CANOVAS, Manuel Fernandez. *Dosificación de hormigón reforzado con fibras cortas de acero*. En: Materiales de Construcción. Vol. 47, p. 247-268

ARANA, José Luis y GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. Bilbao (España): Universidad del País Vasco. Servicio Editorial, 2002. ISBN 8483 7345 59 9788 4837 34551.

AMERICAN STANDARD TRADE MARKS. *Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*. USA: ASTM, 2007. 9 p. ASTM C1017 / C1017M - 07.

AMERICAN STANDARD TRADE MARKS. *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete* USA: ASTM, 2011. 4 p. ASTM A820 /A820M - 11.

AVELLA, Cristina Méendez y MENDOZA, Andres Mauricio Nitola. *Caracterización del concreto reforzado con fibras sintéticas y de acero para pisos industriales en Colombia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2004. p.

BARENBLATT, Grigory Isaakovich. *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. En: Advance Applied Mechanics. Junio, 1962. Vol. 7, No. 1, p. 55-129

BARRAGÁN, Bryan. *Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear*. Thesis Doctoral. Barcelona: Laboratori de Tecnologia D'Estructures. Universitat Politècnica de Catalunya, 2002. 151 p.

BAŽANT, Zdeněk. *Size effect in blunt fracture: Concret, rock, metal*. En: Engineering Mechanics, ASCE. Vol. 110, No. 4, p. 518-535

BAŽANT, Zdeněk y OH, B.H. *Crack band theory for fracture of concrete*. En: MATERIALS AND STRUCTURES. Vol. 16, p. 155-177

BAŽANT, Zdeněk y PLANAS, Jaime. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. ISBN 0-8493-8284-X.

BAŽANT, Zdeněk y PRAT, Pere. *Measurement of Mode III fracture energy of concrete*. En: Nuclear Engineering and Design. 1988. Vol. 106, No. 2, p. 1-8

BUI, Than Tien. *Numerical Simulation of Fracture in Plain and Fibre-Reinforced Concrete*. PhD. School of Civil and Environmental Engineering. The University of New South Wales, 2007. p.

CARMONA, Sergio y CABRERA, Manuel. *Comportamiento al corte de hormigones reforzados con fibras de acero*. En: Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 24, No. 1, p. 19-94

CARMONA, Sergio y MARIPANGUI, Fernando. *Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras sometido a Corte*. En: Anales de las XVI Jornadas Chilenas del Hormigón. p. 10

CARMONA, Sergio y CABRERA, Manuel. *Comportamiento al corte de hormigones reforzados con fibras de acero*. En: Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 24, No. 1, p. 19-94

CIFUENTES H. , MEDINA F. *Comparación del valor de la energía de fractura real del hormigón obtenido por distintos procedimientos*. En: Anales de Mecánica de fractura 26. Vol. 1, p. 51-56

CIFUENTES, Hector. *Análisis del comportamiento en fractura y del efecto de borde en hormigones de altas prestaciones reforzados con fibras de polipropileno*. Enero de 2010: Universidad de Sevilla, 2010. p.

CHUANBO, Wang. *Experimental Investigation on Behavoir of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)*. Thesis of Master. New Zeland: Departament of Civil Engineering. University of Canterbury, 2006. 165 p.

DUGDALE, D.S. *Yielding of steel sheets containing slits*. En: Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Mayo, 1960. Vol. 8, No. 2, p. 100-104

ELICES, Manuel, GUINEA, Gustavo y PLANAS, Jaime. *On the Measurement of Concrete Fracture Energy Using Three-point Bend Tests. Part 1 - Influence of experimental procedures*. En: Materials and Structures. 1992. Vol. 25, No. 200, p. 212-218

ELICES, Manuel, GUINEA, Gustavo y PLANAS, Jaime. *On the Measurement of Concrete Fracture Energy Using Three-point Bend Tests. Part 2 - Influence of bulk energy dissipation*. En: Materials and Structures. Vol. 25, No. 200, p. 305-312

ELICES, Manuel, GUINEA, Gustavo y PLANAS, Jaime. *On the Measurement of Concrete Fracture Energy Using Three-point Bend Tests. Part 3 - Influence of cutting the  $P-\delta$  tail*. En: Materials and Structures. Vol. 25, No. 200, p. 327-334

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. *Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio*. ENIU, 2004.

FOSTER, Stephen J. *On Behavior of High-Strength concrete columns: cover spalling, steel fibers, and ductility*. En: ACI Structural Journal. Vol. 98, No. 4, p. 583-589

GRIFFITH, Alan Arnold. *The theory of rupture*. En: Proceedings of the First International Conference of Applied Mechanics. 1924. p. 55-63

HILLERBORG, Arne. *A model for fracture analysis*. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, Division of Building materials, 1978.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Fibras de acero para Refuerzo de concreto*. Primera actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 8 p. NTC 5214.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)*. Segunda actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2004. 9 p. NTC 2871.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Tercera actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2010. 13 p. NTC 673.

JENQ, Y.S. y SHAH, S.P. *Two parameter fracture model for concrete*. En: Engineering Materials ASCE. Vol. 111, p. 1227-1241

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Method of Test for Flexural Strength and flexural Toughness of Fiber Reinforced concrete*. Tokyo: JSCE, 1984. 6 p. SF-4.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete SFRC*. Tokyo: JSCE, 2002. 3 p. SF-6.

KUMAR, Shailendra y BARAI, Sudhirkumar V. *Determining the double-K fracture parameters for three-point bending notched concrete beams using weight function*. En: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 33, p. 645-660

KUMAR, Shailendra y BARAI, Sudhirkumar V. *Concrete fracture models and applications*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. 9783642167645 3642167640.

LEE, Siaw Foon y JACOBSEN, Stefan. *Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar*. En: Materials and Structures. Vol. 44, p. 1451 - 1465

MACCAFERRI DO BRASIL LTDA. *Manual Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón*. Argentina: MACCAFERRI, 2007.

MARTI, Peter, PFYL, Thomas, SIGRIST, Viktor y ULAGA, Tomaz. *Harmonized Test Procedure for Steel Fibre-Reinforced Concrete*. En: ACI Materials Journal. November - December 1996. Vol. 96, No. 6, p. 676-685

MIRSAYAH, Amir y BANTHIA, Nemkumar. *Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete*. En: ACI Materials Journal. September 2002. Vol. 99, No. 5, p. 473-479

NALLATHAMBI, P y KARIHALOO, BC. *Determination of specimen size independent fracture toughness of plain concrete*. En: Magn Concrete Research. Vol. 38, p. 67-76

NATARAJA, M. C., NAGARAJ, T. S. y BASAVARAJA, S. B. *Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance*. En: Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35, No. 12, p. 2350-2359

NAVARRETE, Juan Pablo y SALAZAR, Juan Pablo. *Concreto Reforzado con Fibras Metálicas y Sintéticas*. Bogotá: Centro de Estudios de Estructuras y Materiales. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2009. p.

NEVES, Rui y FERNANDES, Joao. *Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete*. En: Structural Concrete. Vol. 6, No. 1, p. 1-8

PLANAS, Jaime, FATHY, A.M., GUINEA, Gustavo y ELICES, Manuel. *Análisis de un método de ensayo para determinar la curva de ablandamiento del hormigón*. En: Anales de mecánica de la fractura. Vol. 22, p. 565-570

RILEM. *Draft Recommendation (TC50-FMC) Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams*. En: Materials and structures. 1985. Vol. 18, No. 4, p. 287-290

RILEM. *TC-89 FMT, Size Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete*. En: Materials and Structures. Vol. 23, p. 461-465

RILEM. *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete*. En: Materials and Structures. 2001. Vol. 34, p. 3-6

RILEM. *TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test recommendation final*. En: Materials and Structures. 2002. Vol. 35, No. 253, p. 579-582

RILEM. *Final Report, Quasibrittle Fracture Scaling and Size Effect*. En: Materials and Structures. Vol. 37, p. 547-568

SALAZAR, Patricia Cristina Marmól. *Hormigones con fibras de acero características mecánicas*. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. p.

SHAH, S. P., SWARTZ, Stuart E. y OUYANG, Chengsheng. *Fracture mechanics of concrete : applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. New York: Wiley, 1995. 0471303119 9780471303114.

VILLALÓN, Dusami. *Análisis experimental del comportamiento del Hormigón Reforzado con fibras de acero*. Escuela técnica Superior en Ingeniería de la Edificación. Universidad Politécnica de Valencia, 2012. p.

XU, Shilang y REINHARDT, Hans. *Determination of Double-K criterion of for crack propagation in quasi-brittle materials, Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams*. En: International Journal of fracture. Vol. 98, p. 151-177



XU, Shilang y ZHANG, Xiufang. *Determination of fracture parameters for crack, propagation in concrete using an energy approach*. En: Engineering Fracture Mechanics. Vol. 75, p. 4292-4308

ZAINA, Mazen Said. *Strength and ductility of fibre reinforced high strength concrete columns*. 2005: School of Civil and Environmental Engineering. University of New South Wales, 2005. p.

**ANEXO A. FICHAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS**



IG - 030 - 12  
Hoja 1 de 4



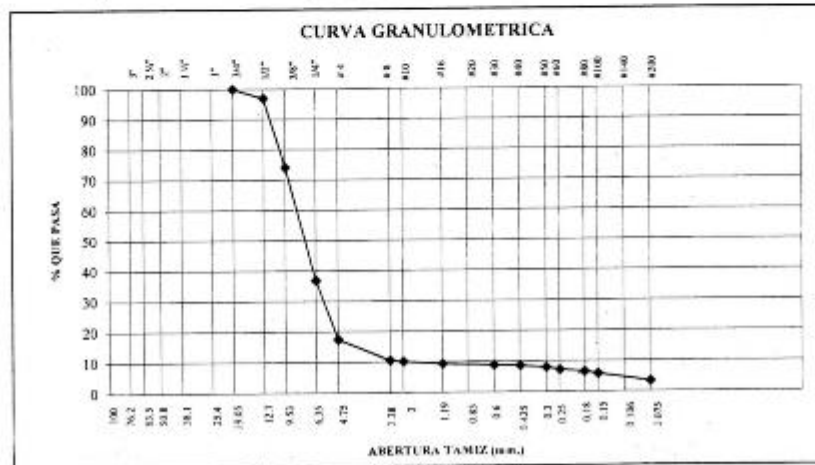
I. MUESTRA N° 1  
Grava

1.1 GRANULOMETRÍA  
Norma ASTM C 136 - 84a y C 117 - 87

Peso material sucio y seco (g) = 2863,0      Peso recipiente (g) = 0,0  
Peso material retenido seco (g) = 2772,2      Peso material pasa No. 200 (g) = 90,8

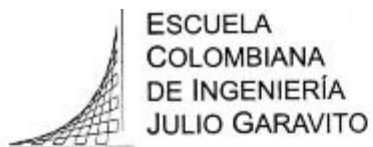
TAMIZ	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO (corregido)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	88,6	88,6	3,1	3,1	97
3/8"	654,1	654,1	22,8	25,9	74
1/4"	1065,4	1065,4	37,2	63,2	37
N° 4	555,1	555,1	19,4	82,5	17
N° 8	198,1	198,1	6,9	89,5	11
N° 10	11,0	11,0	0,4	89,8	10
N° 16	23,0	23,0	0,8	90,6	9
N° 30	13,4	13,4	0,5	91,1	9
N° 40	8,2	8,2	0,3	91,4	9
N° 50	17,8	17,8	0,6	92,0	8
N° 60	21,7	21,7	0,8	92,8	7
N° 80	19,3	19,3	0,7	93,5	7
N° 100	21,4	21,4	0,7	94,2	6
No. 200	71,7	71,7	2,5	96,7	3,3
Fondo	3,4	3,4	3,3	100,0	0,0

Suma pesos retenidos (g) = 2772,2



LF 01 - Marzo 03 2008 - PRONTO PRINTER LTDA

Ak 45 N° 205-59 (autopista Norte, kilómetro 13)  
PBX: (571) 668 3600 • Fax: 676 2340 • A.A. 14520 • Bogotá, D.C. (1029), Colombia  
www.escuelaing.edu.co



IG - 030 - 12  
Hoja 3 de 4



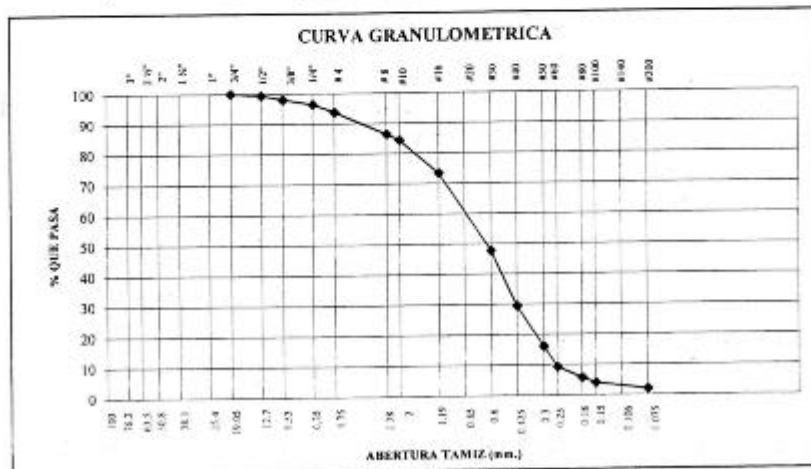
2. MUESTRA N° 2  
Arena

2.1 GRANULOMETRÍA  
Norma ASTM C 136 - 84a y C 117 - 87

Peso material sucio y seco (g) = 1197,0      Peso recipiente (g) = 0,0  
Peso material retenido seco (g) = 1175,4      Peso material pasa No. 200 (g) = 21,6

TAMIZ	PESO MATERIAL + RECIPIENTE (g)	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO (corregido)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	6,7	6,7	0,6	0,6	99
3/8"	16,8	16,8	1,4	2,0	98
1/4"	19,7	19,7	1,6	3,6	96
N° 4	31,0	31,0	2,6	6,2	94
N° 8	89,4	89,4	7,5	13,7	86
N° 10	23,8	23,8	2,0	15,7	84
N° 16	131,9	131,9	11,0	26,7	73
N° 30	307,0	307,0	25,6	52,3	48
N° 40	218,6	218,6	18,3	70,6	29
N° 50	159,6	159,6	13,3	83,9	16
N° 60	81,4	81,4	6,8	90,7	9
N° 80	42,1	42,1	3,5	94,2	6
N° 100	21,0	21,0	1,8	96,0	4
No. 200	24,9	24,9	2,1	98,1	1,9
Fondo	1,5	1,5	1,9	100,0	0,0

Suma pesos retenidos (g) = 1175,4



L.P. 01 - Marzo 03 2003 - FRONTON PRINTER LTDA.

Ak 45 N° 205-59 (autopista Norte, kilómetro 13)  
PBX: (571) 668 3600 • Fax: 676 2340 • A.A. 14520 • Bogotá, D.C. (1029), Colombia  
www.escuelainq.edu.co

**Muestra 1: Grava**

IG - 030 - 12  
Hoja 2 de 4



**1.2 PESO UNITARIO**  
Norma ASTM C 29-78

*Procedimiento:*  
Punzonamiento con barra sobre muestra representativa.

*Resultado:*  
Peso unitario suelto = 1354,8 kg/m<sup>3</sup>  
Peso unitario compactado = 1547,0 kg/m<sup>3</sup>

**1.3 DENSIDAD Y ABSORCION**  
Norma ASTM C 128-84

*Resultados:*  
Densidad nominal = 2,617 g/cm<sup>3</sup>  
Densidad cond. saturada y seca = 2,442 g/cm<sup>3</sup>  
Densidad aparente = 2,334 g/cm<sup>3</sup>  
Absorción = 4,6 %

**Muestra 2: Arena**

IG - 030 - 12  
Hoja 4 de 4



**2.2 PESO UNITARIO**  
Norma ASTM C 29-78

*Procedimiento:*  
Punzonamiento con barra sobre muestra representativa.

*Resultado:*  
Peso unitario suelto = 1498,8 kg/m<sup>3</sup>  
Peso unitario compactado = 1655,2 kg/m<sup>3</sup>

**2.3 DENSIDAD Y ABSORCION**  
Norma ASTM C 128-84

*Resultados:*  
Densidad aparente = 2,528 g/cm<sup>3</sup>  
Densidad cond. saturada = 2,558 g/cm<sup>3</sup>  
Densidad nominal = 2,604 g/cm<sup>3</sup>  
Absorción = 1,2 %

Fibra metálica IMOCOM (patente BEKAERT)



**Description:** Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-80/60-BN is a cold drawn wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.

**Applications:**

- jointless floors
- suspended ground slabs
- jointless floors on vibrocompacted piles
- industrial floors
- slabs on vibro-compacted piles
- liquid tight floors
- overlays
- pavements
- segmental linings
- compression layers
- cellar walls
- precast

**Geometry:**

Length (l) 80 mm  
Diameter (d) 0,75 mm

Performance class: 80  
Aspect ratio (= l/d): 80  
4600 fibres/kg

**Tensile strength:**

- on the wire: minimum 1050 N/mm<sup>2</sup>
- low carbon conforms to EN 10016-2 - C9D

**Coating:** None

**Approvals:**

Conforms to **ASTM A820**

Product  
Belgium  
**ATG 04/1857**

The Netherlands  
**22702**

Turkey  
**TS 10513**

Czech Republic  
**C.070-021415**

Quality System in  
Belgian, Brazilian, Czech,  
Turkish and Chinese plants

**ISO 9001**

Product  
Poland  
**AT-15-2117/2001**

Romania  
**007-01/068-2003**

Germany  
**Z-3.71-1745**

Slovak Republic  
**1402A/02/0771/1/C/C04**

**Technical data:**

**Recommendations - mixing**

**1. General**

- ✓ preferably use a central batching plant mixer
- ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m <sup>3</sup> )	
	pour	pump
8	60	45
16	50	35
32	35	30

- ✓ a continuous grading is preferred
- ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
- ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended



**2. Fibre addition**

Bags are non-degradable and may not be thrown into the concrete.



**2.1. In batching plant mixer**

- ✓ never add fibres as first component in the mixer
- ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete

**2.2. Truckmixer**

- ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
- ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
- ✓ add fibres with maximum speed of 40 kg/min
- ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
- ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)

**2.3. Automatic dosing**

- ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3,5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

**Recommendations - storage**

Protect the pallets against rain

Do not stack the pallets on top of each other

**Delivered in**

non water-soluble bags of 20 kg on pallet 1200 kg  
big bag 1100 kg

N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium  
Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47  
Internet: <http://www.bekaert.com/building>

www.bekaert.com

Bekaert/1411/1411/1411/1411/1411

## Superplastificante



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
www.toxement.com.co

# PLASTOL 6000

Aditivo hiperplastificante para concretos especiales

TX40T236

### DESCRIPCION

**PLASTOL 6000** es un aditivo reductor de agua de alto rango, de la más reciente tecnología a base de polycarboxilatos, formulado específicamente para aumentar drásticamente la manejabilidad de un concreto, siendo capaz de llevar una mezcla de cero asentamiento a un estado plástico de alta manejabilidad con dosis bajas. Cumple con la norma ASTM C-494 Tipo A, como reductor de agua y Tipo F como reductor de agua de alto rango y la AASHTO M-194.

### INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido de baja viscosidad  
Color : Verde oliva  
Contenido de Cloruros : Ninguno  
Densidad : 1.06 kg/l +/- 0.03 kg/l

### USOS

**PLASTOL 6000** es especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto de alta fluidez
- Concretos prefabricados
- Concretos de altas resistencias iniciales
- Concretos preesforzados
- Concretos bombeados
- Concretos autonivelantes
- Como reductor de agua, para incremento considerable de resistencias.
- Para disminuir la segregación y aumentar la cohesividad del concreto fluido.
- Para concretos de retracción controlada.
- Sistemas industrializados
- Concretos Fast – Track
- Concretos autonivelantes.

### VENTAJAS

- En concretos fluidos no presenta sangrado.
- Permite colocar fácilmente concretos de alta resistencia y baja relación agua/cemento.
- Permite un desencofrado rápido.
- Incrementa las resistencias a compresión a edades iniciales y finales.
- Incrementa la durabilidad

- Mantiene o excede las resistencias a compresión originales aplicado en consistencia fluida.
- Reduce los tiempos de producción por una rápida colocación.
- Permite dar mejor acabado al concreto.
- Diseños de mezcla más económicos.
- Permite reducción de agua de amasado entre el 30% y el 50%.
- No tiene cloruros ni agentes corrosivos.
- Recomendado para concretos autocompactantes.

### DOSIFICACION

Cuando se usa como reductor de agua la dosis recomendada de **PLASTOL 6000** es de 0.5% (4.7 cc/kg de cemento) - 1% (10 cc/kg de cemento).

Cuando se usa como superplastificante o autocompactante la dosis recomendada de **PLASTOL 6000** es de 0.3% (3 cc/kg de cemento) - 0.6% (6 cc/kg de cemento).

Cuando se adiciona en la planta, éste debe ser colocado con el agua de amasado. Cuando se adiciona en obra se debe mezclar el concreto durante 5 minutos a alta velocidad en el trompo.

Las dosis de **PLASTOL 6000** se ven afectadas por los materiales utilizados, condiciones de trabajo, temperatura, etc., se pueden requerir dosificaciones diferentes a las especificadas en esta ficha.

### COMPATIBILIDAD

**PLASTOL 6000** es compatible con otros aditivos. Se recomienda hacer pruebas previas para determinar el comportamiento de los aditivos cuando se usan juntos. Cuando se dosifica mas de un aditivo a la mezcla, éstos deben adicionarse separados.

### APLICACION

**PLASTOL 6000** puede ser adicionado con el agua inicial de diseño o cuando la mezcla de concreto se encuentra completamente húmeda. No adicionar el aditivo directamente al cemento seco.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: [atencioncliente@toxement.com.co](mailto:atencioncliente@toxement.com.co)  
[www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co)

#### COMO FLUIDIFICANTE:

**PLASTOL 6000** adicionado a una mezcla de consistencia normal, fluidifica el concreto haciéndolo óptimo para el bombeo.

#### COMO REDUCTOR DE AGUA:

**PLASTOL 6000** permite obtener reducciones en el agua de amasado entre 30% y 50%, incrementando las resistencias mecánicas iniciales y finales. Reduce la permeabilidad del concreto y acelera las resistencias del diseño.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Junio 22 de 2010

#### RECOMENDACIONES ESPECIALES

- Determine la dosis adecuada mediante ensayos previos
- En concretos fluidos se debe ajustar el diseño para mantener la homogeneidad de la mezcla.
- La granulometría de los agregados debe ser continua.
- No debe adicionarse a la mezcla, ni al cemento secos.
- No usar aire comprimido para su agitación.
- Mezclas con **PLASTOL 6000** pueden incluir aire hasta en un 7% sin afectar resistencias finales.
- No mezclar por tiempo mayor a 5 minutos.
- En concretos autocompactantes se recomienda manejar la proporción de grava - arena: 48% - 52%.
- Tamaño máximo del agregado grueso: 12.5 mm.
- Arenas con módulo de finura entre 1.5 - 2.5.

#### ALMACENAMIENTO

**PLASTOL 6000** debe almacenarse a temperaturas por encima de 0°C. **PLASTOL 6000** no es un material peligroso pero se recomienda emplear elementos de seguridad para su manipulación.

Vida útil de almacenamiento: 6 meses a granel y 1 año en tambor

#### PRESENTACION

Garrafa:	20 kg
Tambor plástico:	220 kg
Granel	

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co) para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los substratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.



### Cemento gris Portland tipo I (marca Argos)

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	–
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub> , máximo (%)	3.50	3.50	–
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Fraguado inicial <sup>(1)</sup> , mínimo (minutos)	90	45	45
Fraguado final <sup>(1)</sup> , máximo (minutos)	320	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.80	0.80	0.80
Expansión en agua <sup>(2)</sup> , máximo (%)	0.02	–	0.02
Resistencia a 3 días <sup>(3)</sup> , mínimo (Mpa)	9	8.0	13
Resistencia a 7 días <sup>(3)</sup> , mínimo (Mpa)	16	15.0	20
Resistencia a 28 días <sup>(3)</sup> , mínimo (Mpa)	26	24.0	28

(1) Ensayo con aguja de Vicat según NTC 118

(2) Ensayo en barras de mortero a 14 días

(3) Ensayo a compresión sobre cubos de mortero con arena normalizada

## Recomendaciones

Las especificaciones del Cemento Gris de Uso General producido por Cementos Argos S.A. cumplen con los valores de la norma colombiana NTC 121 y 321.

Adicionalmente, en la elaboración de concretos se recomienda la revisión y aplicación de la NTC 3318 y NSR-10, requisitos de producción, calidad y durabilidad.

## **ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLAS**

## MEZCLA M-POO

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	857.0	2.442	350.942
Agregado Fino (S)	730.7	2.528	289.058
Superplastificante	0	1.03	0.000
Fibra metálica	0	8.00	0.000
		Vol Total	<b>1000.000</b>

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	6.29	4.60	870.85
Arena	6.37	1.20	768.07
Agua			165.39

cant req. 0.04 m<sup>3</sup>  
(2 cil + 2 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	15,625
Agua (W)	216.0	165.39	5,982
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	857.0	910.905	32,947
Agregado Fino (S)	730.7	777.287	28,114
Superplastificante	0.0	0.000	-
Fibra metálica	0.0	0.000	-
TOTAL	2235.7	2285.6	82,669

## MEZCLA M-P10

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	844.369	2.442	345.769
Agregado Fino (S)	690.847	2.528	284.231
SP EUKON37	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	80	8.00	10.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	3.49	4.60	835.41
Arena	5.85	1.20	722.59
Agua			193.22

cant req. 0.03 m<sup>3</sup>  
(2 cil + 2 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	13,293
Agua (W)	216.0	193.22	5,945
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	844.4	873.837	26,888
Agregado Fino (S)	690.8	731.262	22,501
SP EUKON37			
IMOCOM 80/60	80.0	80.0	2,462
TOTAL		2310.3	71,088

## MEZCLA M-P20

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	830.970	2.442	340.283
Agregado Fino (S)	679.880	2.528	279.717
SP EUKON37	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	160	8.00	20.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	6.83	4.60	848.69
Arena	5.97	1.20	711.93
Agua			166.24

cant req. 0.03 m<sup>3</sup>  
(2 cil + 2 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	13,293
Agua (W)	216.0	166.24	5,115
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	831.0	887.725	27,315
Agregado Fino (S)	679.9	720.469	22,169
SP EUKON37			
IMOCOM 80/60	160.0	160.0	4,923
TOTAL		2366.4	72,815

## MEZCLA M-A00

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{sss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	844.369	2.442	345.769
Agregado Fino (S)	690.847	2.528	294.231
SP EUKON37	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	0	8.00	0.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	5.21	4.60	849.29
Arena	5.76	1.20	721.98
Agua			179.95

cant req. 0.11 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	48,756
Agua (W)	216.0	179.95	20,309
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	844.4	888.361	100,262
Agregado Fino (S)	690.8	730.640	82,461
SP EUKON37	0.0	0.000	-
IMOCOM 80/60	0.0	0.0	-
TOTAL		2230.9	251,788

## MEZCLA M-A05

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{sss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	844.369	2.442	345.769
Agregado Fino (S)	690.847	2.528	289.231
SP EUKON37	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	40	8.00	5.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	5.21	4.60	849.29
Arena	5.76	1.20	721.98
Agua			179.95

cant req. 0.104 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	45,006
Agua (W)	216.0	179.95	18,747
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	844.4	888.361	92,549
Agregado Fino (S)	690.8	730.640	76,118
SP EUKON37			-
IMOCOM 80/60	40.0	40.0	4,167
TOTAL		2270.9	236,586

### MEZCLA M-A10

26-may

#### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

#### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

#### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	844.369	2.442	345.769
Agregado Fino (S)	690.847	2.528	284.231
SP EUKON37	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	80	8.00	10.000
		Vol Total	1000.000

#### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.18	4.60	840.98
Arena	4.44	1.20	712.97
Agua			197.27

cant req. 0.104 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	45,006
Agua (W)	216.0	197.27	20,552
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	844.4	879.664	91,643
Agregado Fino (S)	690.8	721.521	75,168
SP EUKON37			
IMOCOM 80/60	80.0	80.0	8,334
TOTAL		2310.5	240,703



## MEZCLA M-A20

26-may

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216.0 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.50
	f'c estimada	275 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	432.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados		
(Acorde ACI 211.1)	G	0.550
	S	0.450

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	432.0	3.000	144.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	831.0	2.442	340.295
Agregado Fino (S)	680.0	2.528	279.705
SP PLASTOL6000	0	1.185	0.000
IMOCOM 80/60	160	8.00	20.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.18	4.60	827.66
Arena	4.44	1.20	701.77
Agua			197.57

cant req. 0.104 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	432.0	432.00	45,006
Agua (W)	216.0	197.57	20,583
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	831.0	865.736	90,192
Agregado Fino (S)	680.0	710.192	73,988
SP PLASTOL6000		2.534	264
IMOCOM 80/60	160.0	160.0	16,669
TOTAL		2368.0	246,700

## MEZCLA M-B00

02-jun

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire

2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado **216 Kg/m<sup>3</sup>**  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.58
	f'c estimada	210 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	372.4 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	372.4	3.000	124.138
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	787.32	2.528	311.439
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	0	8.00	0.000
		Vol Total	<b>1000.000</b>

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.46	4.60	849.71
Arena	4.62	1.20	813.92
Agua			217.21

cant req. 0.109 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	372.4	372.41	40,415
Agua (W)	216.0	217.21	23,571
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	888.798	96,453
Agregado Fino (S)	787.3	823.691	89,387
Superplastificante (SP)	0.0	0.000	-
Fibra metálica (SF)	0.0	0.0	-
TOTAL		2302.1	249,826

## MEZCLA M-B05

02-jun

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire

2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado **216 Kg/m<sup>3</sup>**  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.58
	f'c estimada	210 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	372.4 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	372.4	3.000	124.138
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	774.68	2.528	306.439
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	40	8.00	5.000
		Vol Total	<b>1000.000</b>

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.46	4.60	849.71
Arena	4.62	1.20	800.86
Agua			217.20

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	372.4	372.41	41,877
Agua (W)	216.0	217.20	24,423
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	888.798	99,943
Agregado Fino (S)	774.7	810.467	91,135
Superplastificante (SP)	0.0	0.000	-
Fibra metálica (SF)	40.0	40.0	4,498
TOTAL		2328.9	261,876

## MEZCLA MB10

16-jun

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.58
	f'c estimada	210 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	372.4 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	372.4	3.000	124.138
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	762.04	2.528	301.439
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	80	8.00	10.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.63	4.60	851.09
Arena	5.10	1.20	791.40
Agua			215.75

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	372.4	372.41	41,877
Agua (W)	216.0	215.75	24,260
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	890.244	100,106
Agregado Fino (S)	762.0	800.901	90,059
Superplastificante (SP)	0.0	0.000	-
Fibra metálica (SF)	80.0	80.0	8,996
TOTAL		2359.3	265,298

## MEZCLA MB20

16-jun

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire

2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado **216 Kg/m<sup>3</sup>**  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.58
	f'c estimada	210 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	372.4 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	372.4	3.000	124.138
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	736.76	2.528	291.439
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	160	8.00	20.000
		Vol Total	<b>1000.000</b>

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	4.63	4.60	851.09
Arena	5.10	1.20	765.15
Agua			215.75

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	372.4	372.41	41,877
Agua (W)	216.0	215.75	24,260
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	890.244	100,106
Agregado Fino (S)	736.8	774.331	87,072
Superplastificante (SP)	0.0	1.859	209
Fibra metálica (SF)	160.0	160.0	17,992
TOTAL		2414.6	271,515

## MEZCLA M-C00

7 jul.-2012

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.40
	f'c estimada	350 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	540.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	540.0	3.000	180.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	646.10	2.528	255.577
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	0	8.00	0.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	3.40	4.60	841.09
Arena	4.07	1.20	664.42
Agua			225.45

cant req. 0.109 m<sup>3</sup>  
(8 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	540.0	540.00	58,601
Agua (W)	216.0	225.45	24,465
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	879.779	95,474
Agregado Fino (S)	646.1	672.393	72,968
Superplastificante (SP)	0.0	0.000	-
Fibra metálica (SF)	0.0	0.0	-
TOTAL		2317.6	251,509

## MEZCLA M-C05

7 jul.-2012

### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.40
	f'c estimada	350 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	540.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	540.0	3.000	180.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	633.46	2.528	250.577
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	40	8.00	5.000
		Vol Total	1000.000

### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	3.40	4.60	841.09
Arena	4.07	1.20	651.42
Agua			225.37

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	540.0	540.00	60,722
Agua (W)	216.0	225.37	25,342
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	879.779	98,929
Agregado Fino (S)	633.5	659.239	74,130
Superplastificante (SP)	0.0	0.445	50
Fibra metálica (SF)	40.0	40.0	4,498
TOTAL		2344.8	263,670

### MEZCLA M-C10

28 jul.-2012

#### 1. Características de los Agregados

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{ss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

#### 2. Estimación del Contenido de Aire 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.40
	f'c estimada	350 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	540.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

#### 2. Dosificación por Volumen Absoluto

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	540.0	3.000	180.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	620.82	2.528	245.577
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	80	8.00	10.000
		Vol Total	1000.000

#### Corrección por humedades de campo

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	3.56	4.60	842.39
Arena	3.86	1.20	637.14
Agua			224.05

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	540.0	540.00	60,722
Agua (W)	216.0	224.05	25,194
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	881.140	99,082
Agregado Fino (S)	620.8	644.781	72,504
Superplastificante (SP)	0.0	1.338	150.4
Fibra metálica (SF)	80.0	80.0	8,996
TOTAL		2371.3	266,647



### **MEZCLA M-C20**

28 jul.-2012

#### **1. Características de los Agregados**

		Grueso (G)	Fino (S)
Masa Unitaria Suelta:	Kg/m <sup>3</sup>	1354.8	1498.8
Masa Unitaria Compacta:	Kg/m <sup>3</sup>	1547.0	1655.2
Densidad Aparente ( $\rho_{apa}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.334	2.528
Densidad saturada y seca ( $\rho_{sss}$ ):	g/cm <sup>3</sup>	2.442	2.558
Absorción (CA):		4.6%	1.2%
Asentamiento estimado (mm):		75	

#### **2. Estimación del Contenido de Aire** 2.50%

Estimación del Contenido de Agua de Mezclado 216 Kg/m<sup>3</sup>  
ACI 211.1 Tabla A.1.5.3.3.

Selección de la Relación Agua-Cemento	W/C:	0.40
	f'c estimada	350 Kg / cm <sup>2</sup>
Contenido de Cemento	C:	540.0 Kg/m <sup>3</sup>
Modulo de finura Arena	MF:	2.79
Porcentajes Agregados (Acorde ACI 211.1, y ACI 544)	b/b <sub>0</sub>	0.55

#### **2. Dosificación por Volumen Absoluto**

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico g/cm <sup>3</sup>	Volumen Absoluto l/m <sup>3</sup>
Cemento (C)	540.0	3.000	180.000
Agua (W)	216.0	1.000	216.000
Contenido de aire	0.0	0.000	0.000
Agregado Grueso (G)	850.85	2.442	348.423
Agregado Fino (S)	595.54	2.528	235.577
Superplastificante (SP)	0	1.185	0.000
Fibra metálica (SF)	160	8.00	20.000
		<b>Vol Total</b>	<b>1000.000</b>

#### **Corrección por humedades de campo**

	H (%)	CA (%)	W corr(Kg)
Grava	3.56	4.60	842.39
Arena	3.86	1.20	611.19
Agua			223.91

cant req. 0.112 m<sup>3</sup>  
(10 cil + 6 vgs)

Ingrediente	Peso seco Kg/m <sup>3</sup>	Peso humedo Kg/m <sup>3</sup>	Peso req. ensayos g
Cemento (C)	540.0	540.00	60,722
Agua (W)	216.0	223.91	25,178
Contenido de aire	0.0	0.000	-
Agregado Grueso (G)	850.9	881.140	99,082
Agregado Fino (S)	595.5	618.525	69,552
Superplastificante (SP)	0.0	1.779	200.1
Fibra metálica (SF)	160.0	160.0	17,992
<b>TOTAL</b>		<b>2425.4</b>	<b>272,725</b>

### ANEXO C. ANÁLISIS GRÁFICO

En la utilización de los LVDTs, o transductores de desplazamiento lineal para medir la deformación o respuesta en algún punto de la probeta se hizo presente un fenómeno de ruido en la señal, el cual es necesario procesar y eliminar a fin de trazar adecuadamente el desplazamiento o respuesta de la probeta al régimen de carga. En las Fotografía 10 se puede ver la localización de los deformímetros en las probetas sometidas a flexión, tracción indirecta (método brasilero) y cortante.

Para la compaginación de los resultados hay que superar dos dificultades: la primera es eliminar el ruido u oscilación inherente en los deformímetros y la segunda compaginar los intervalos de tiempo, dado que la shimadzu realiza lecturas cada 2 segundos y los deformímetros cada 0.1 segundo.

El “ruido” en las señales obtenidas por los LVDT de acuerdo a la información de los fabricantes equivale a 1/10 de la carrera o recorrido.

En todos los casos se ubicaron 2 deformímetros en las caras opuestas de las probetas, con lo cual se garantizan los datos, pues en algunas oportunidades la muestra se deforma preferentemente hacia un costado ocasionando, por ejemplo, que se salga o desvíe el deformímetro, en cuyo caso se puede ignorar su medida.

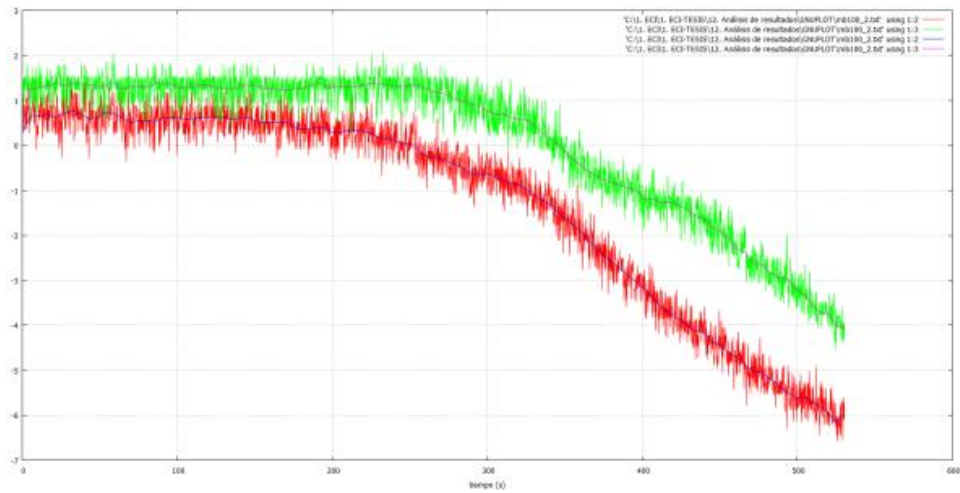
Para el manejo de las gráficas se optó por el programa Matlab, en el cual se aprovechan las operaciones matriciales y de análisis de series de tiempo para “resamplear” los datos a un intervalo uniforme de 0.2 seg y lograr la concatenación.

La eliminación de ruido se realizó mediante el programa MATLAB R2012a usando funciones de suavizado SMOOTH, con lo cual se obtiene una línea de tendencia monotónica y representativa de la deformación.

En la mayoría de casos se realizó un promedio de los deformímetros, excepto cuando durante el ensayo se evidenció desviación excesiva del deformímetro con respecto al punto de control de la probeta. En la Gráfica 42 se visualiza el suavizado de las lecturas.

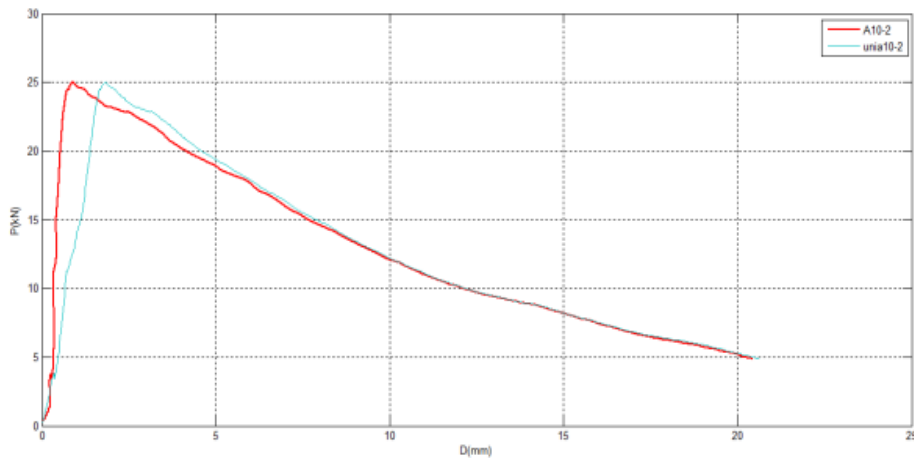


Fotografía 10. Localización de los deformímetros en los ensayos



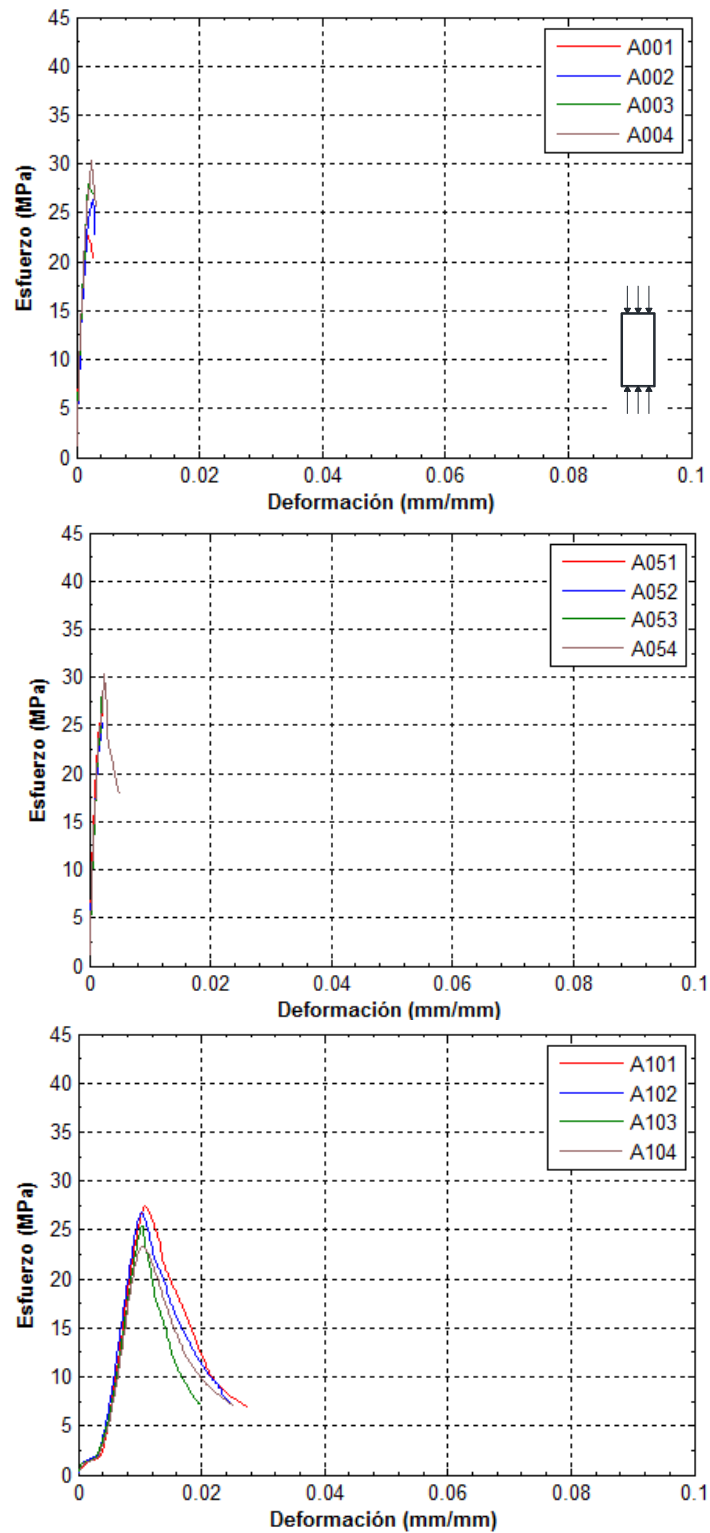
**Gráfica 42. Suavizado de los deformímetros**

Con los datos tabulados en intervalos de tiempo uniforme 0.2 seg, tiempo – carga y tiempo – desplazamiento, se procedió a su concatenación. Al comparar las gráficas obtenidas únicamente por la máquina Universal y la realizada mediante la concatenación de Universal y LVDTs se puede constatar la sobrestimación que tiene la primera, pues como se mencionó anteriormente, registra en realidad el desplazamiento de la mesa y no la deformación de la muestra. En la Gráfica 43 se visualiza el desfase. Por lo demás, el análisis gráfico y cálculo de áreas se realizó con el Matlab mediante funciones para el cálculo de área bajo la curva corregida.

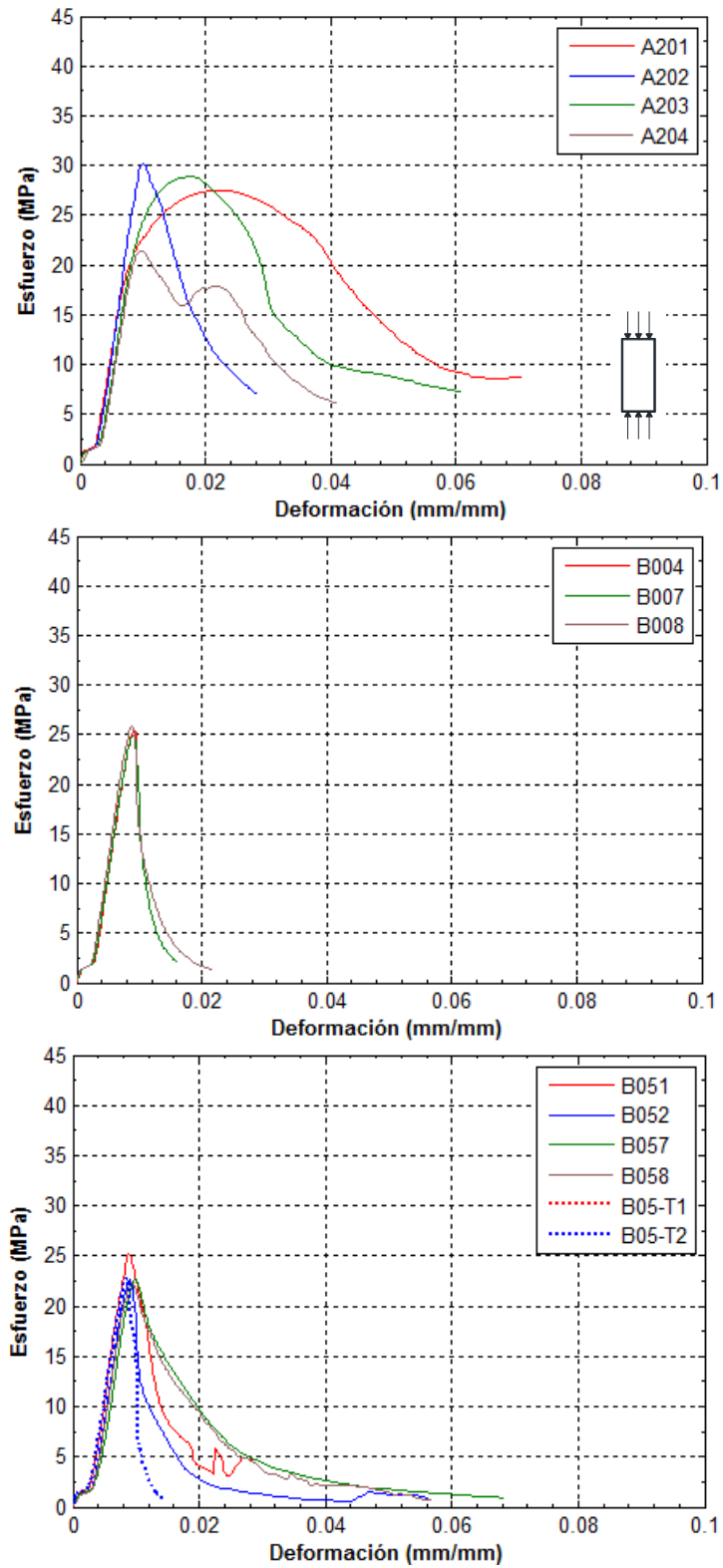


**Gráfica 43. Comparación entre curvas de máquina Universal y LVDTs**

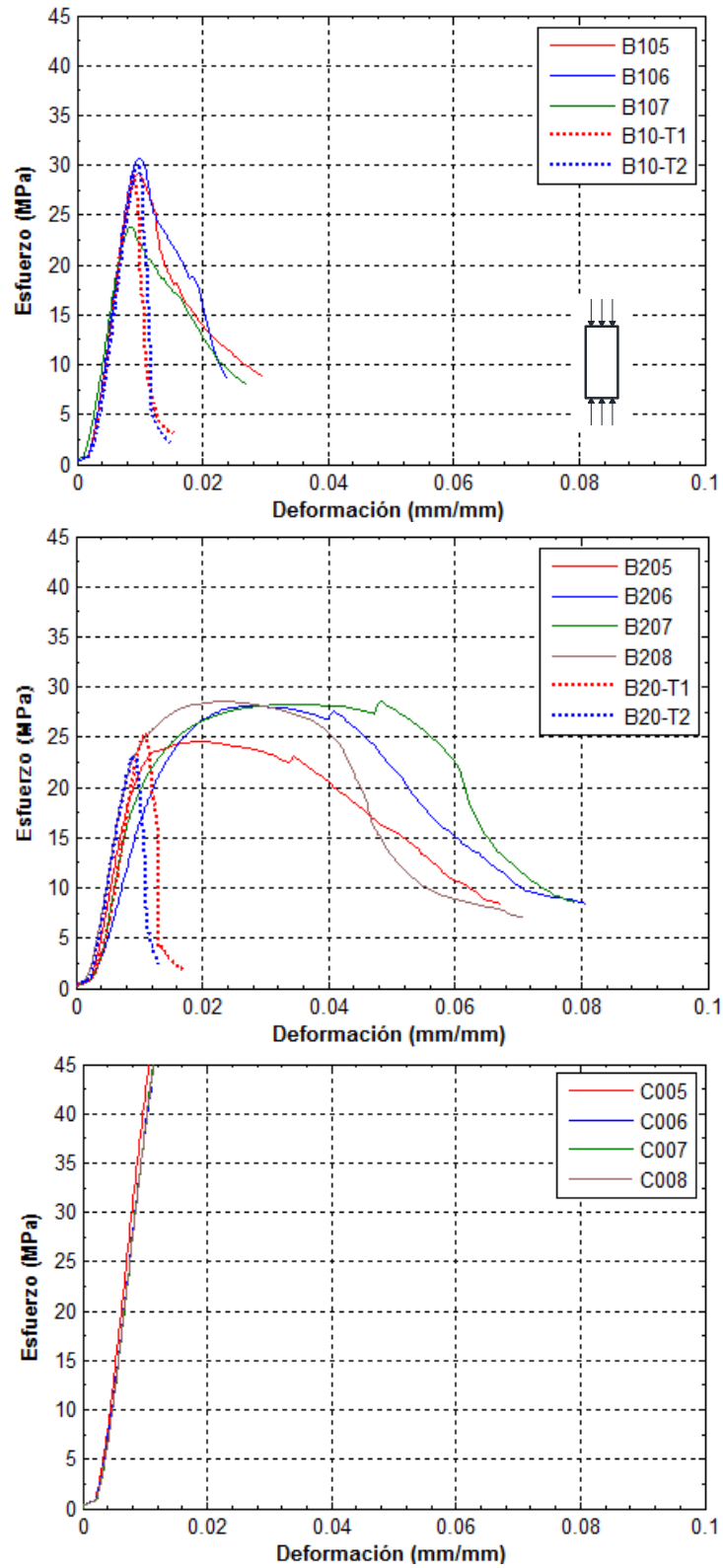
## COMPRESIÓN



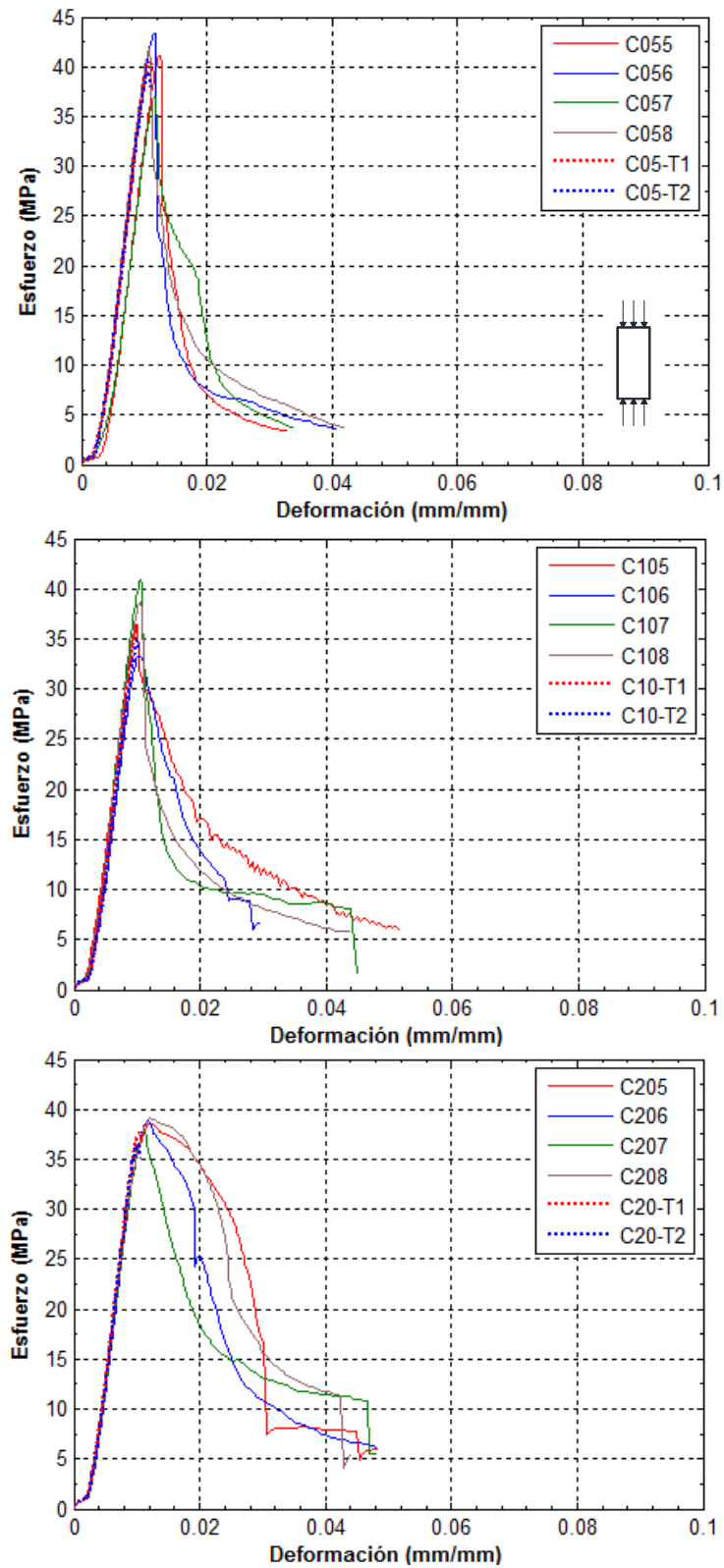
Gráfica 44. Compresión A00, A05 y A10



Gráfica 45. Compresión A20, B00 y B05



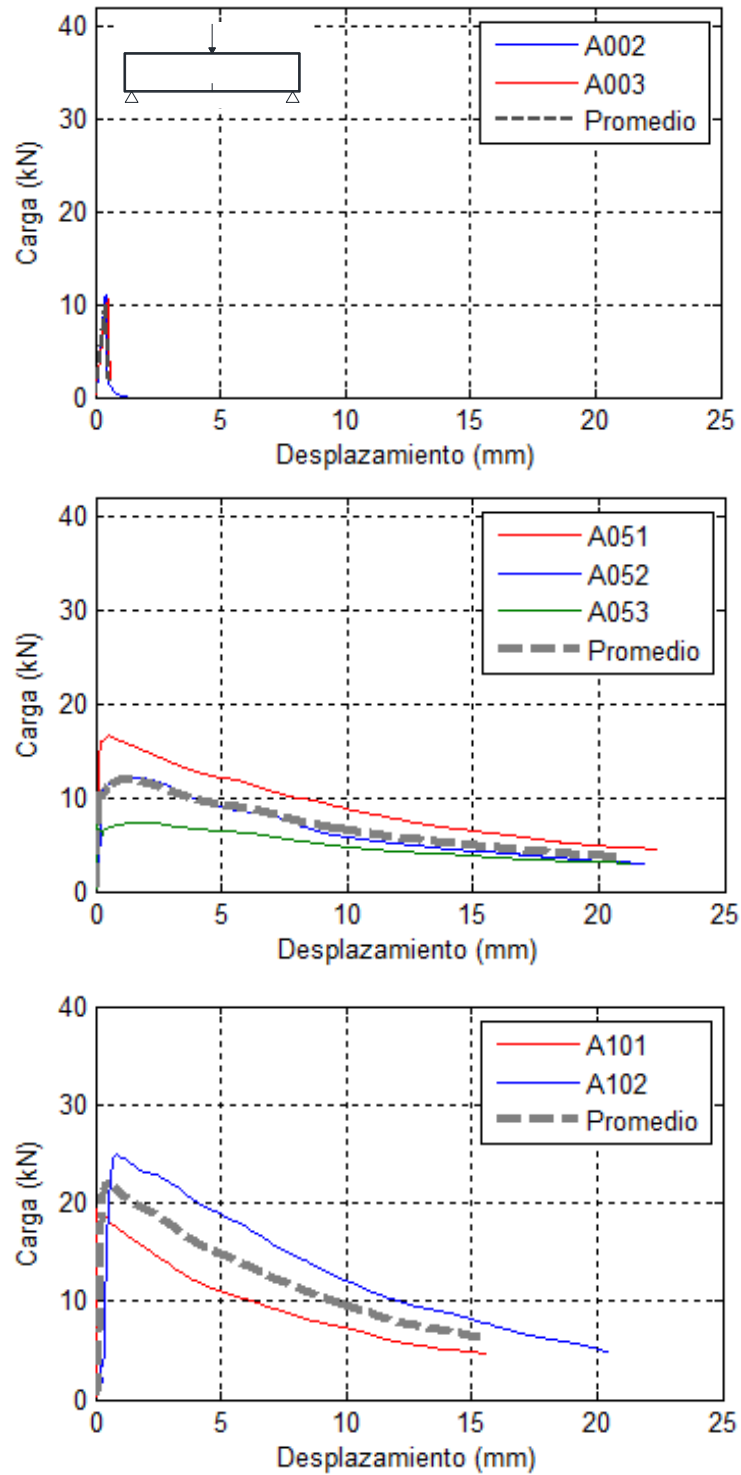
Gráfica 46. Compresión B10,B20 Y C00



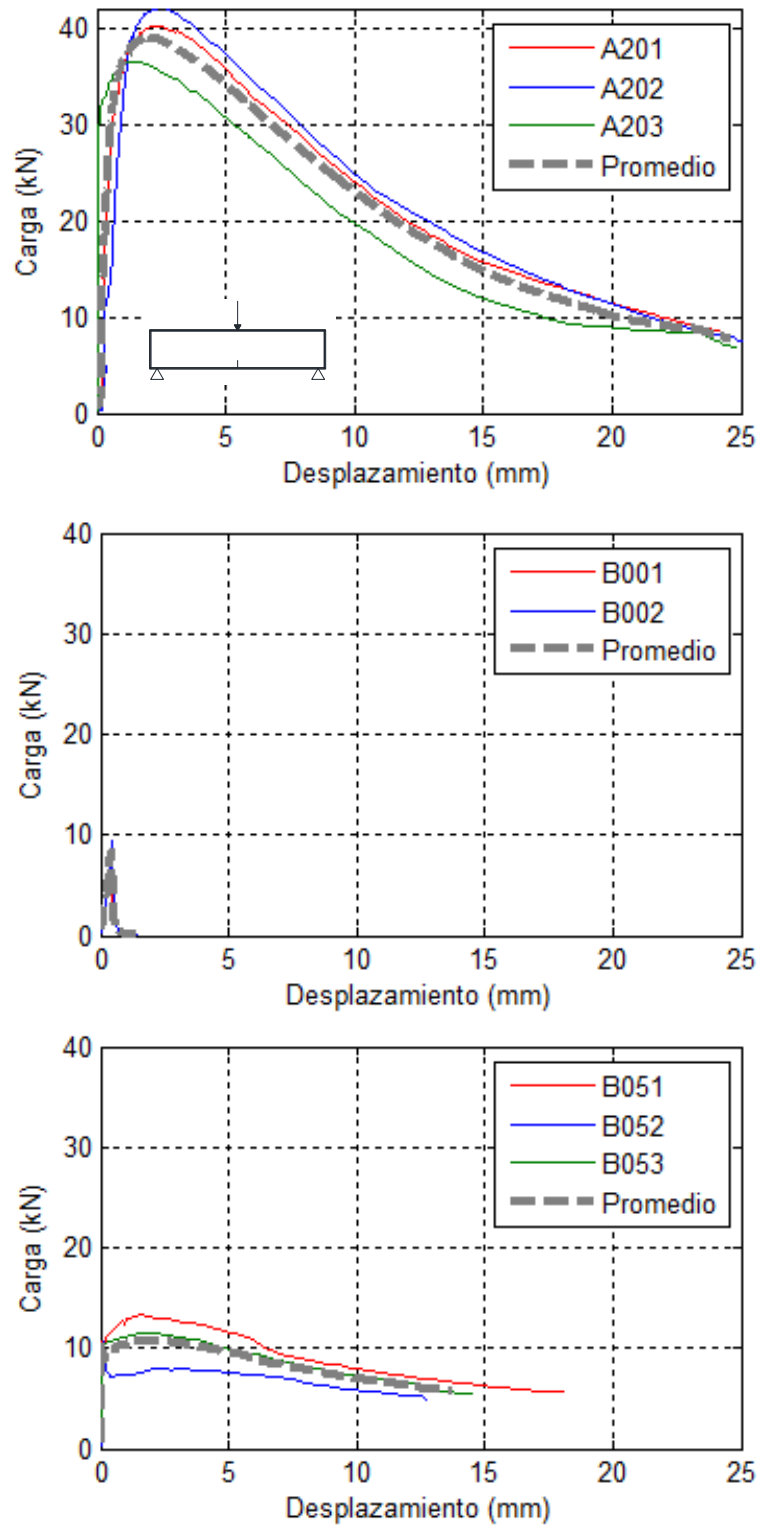
Gráfica 47. Compresión C05, C10 Y C20



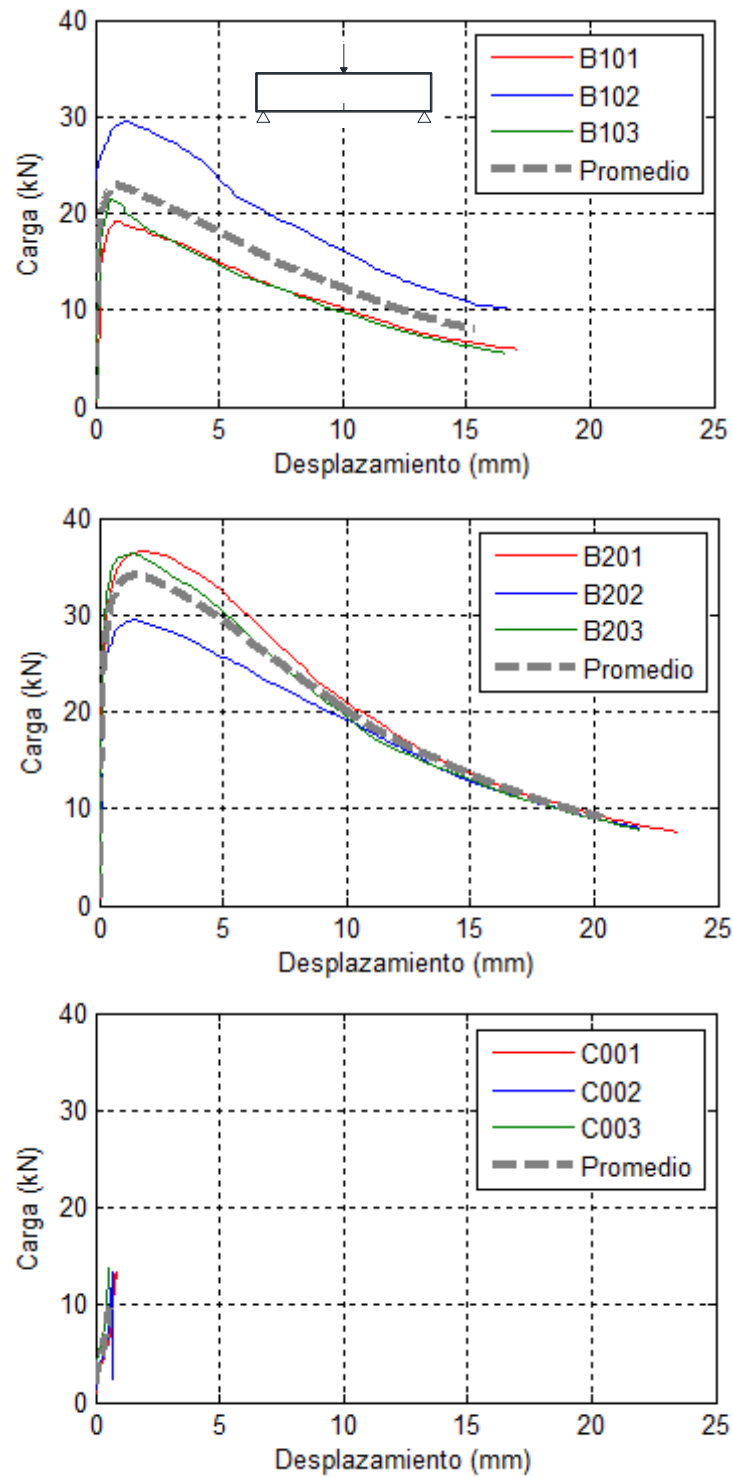
## FLEXIÓN



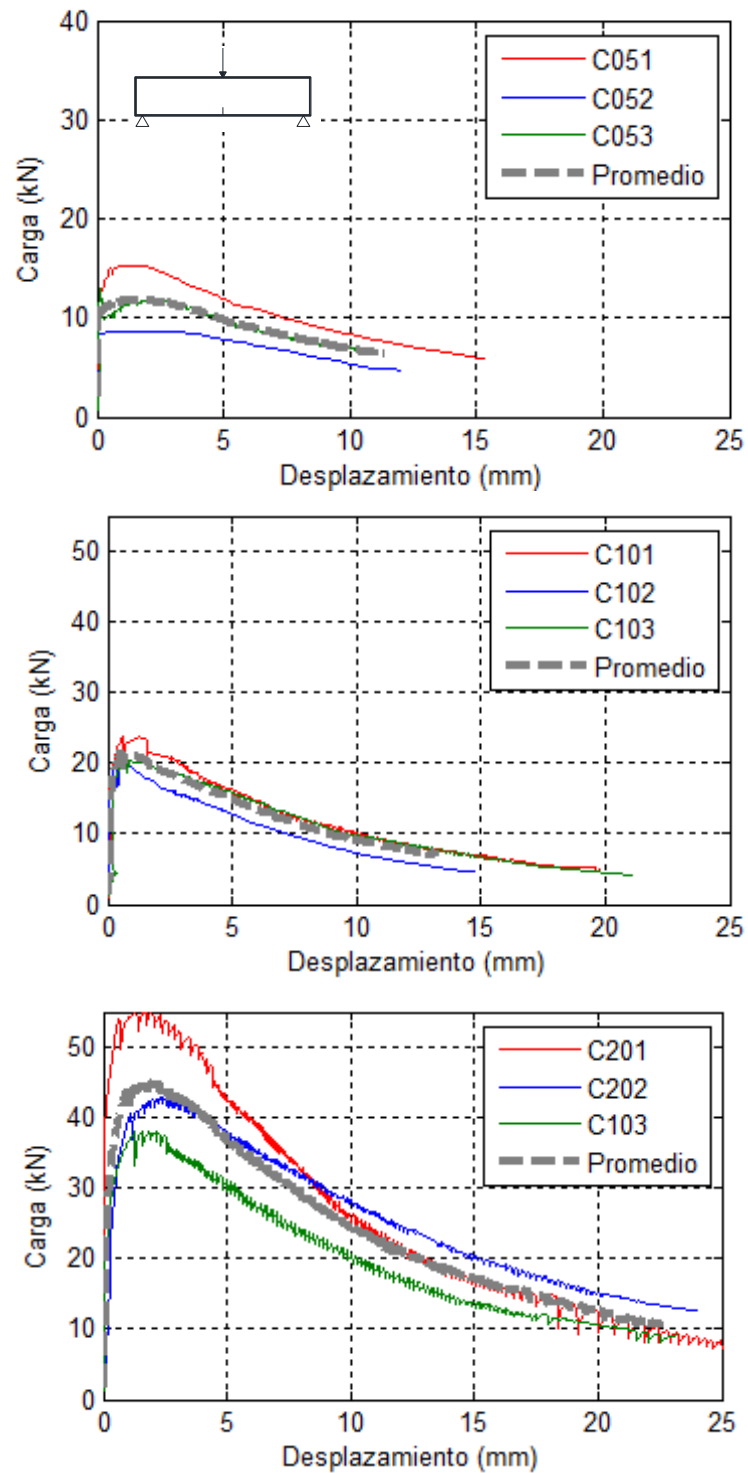
Gráfica 48. Flexión A00, A05 y A10



Gráfica 49. Flexión A20, B00 y B05

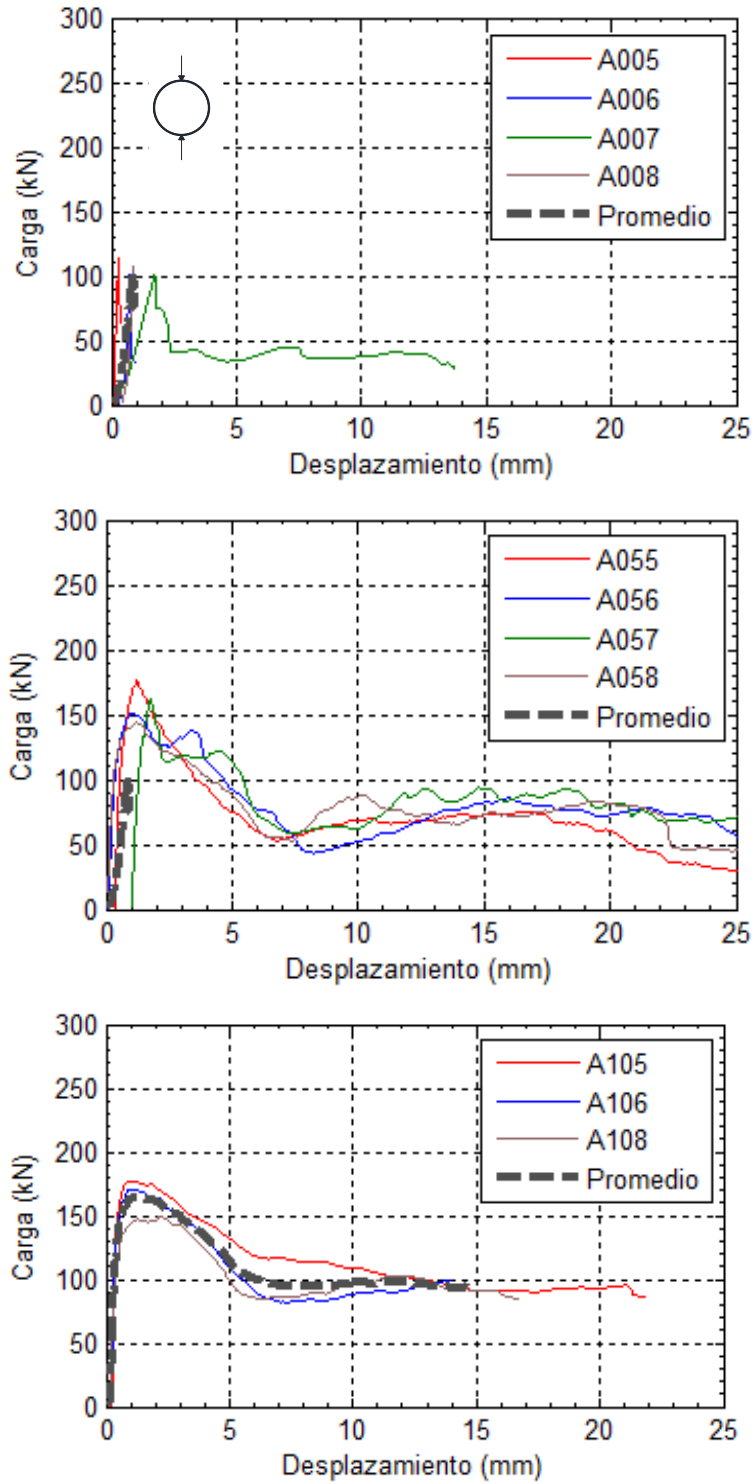


Gráfica 50. Flexión B10,B20 Y C00

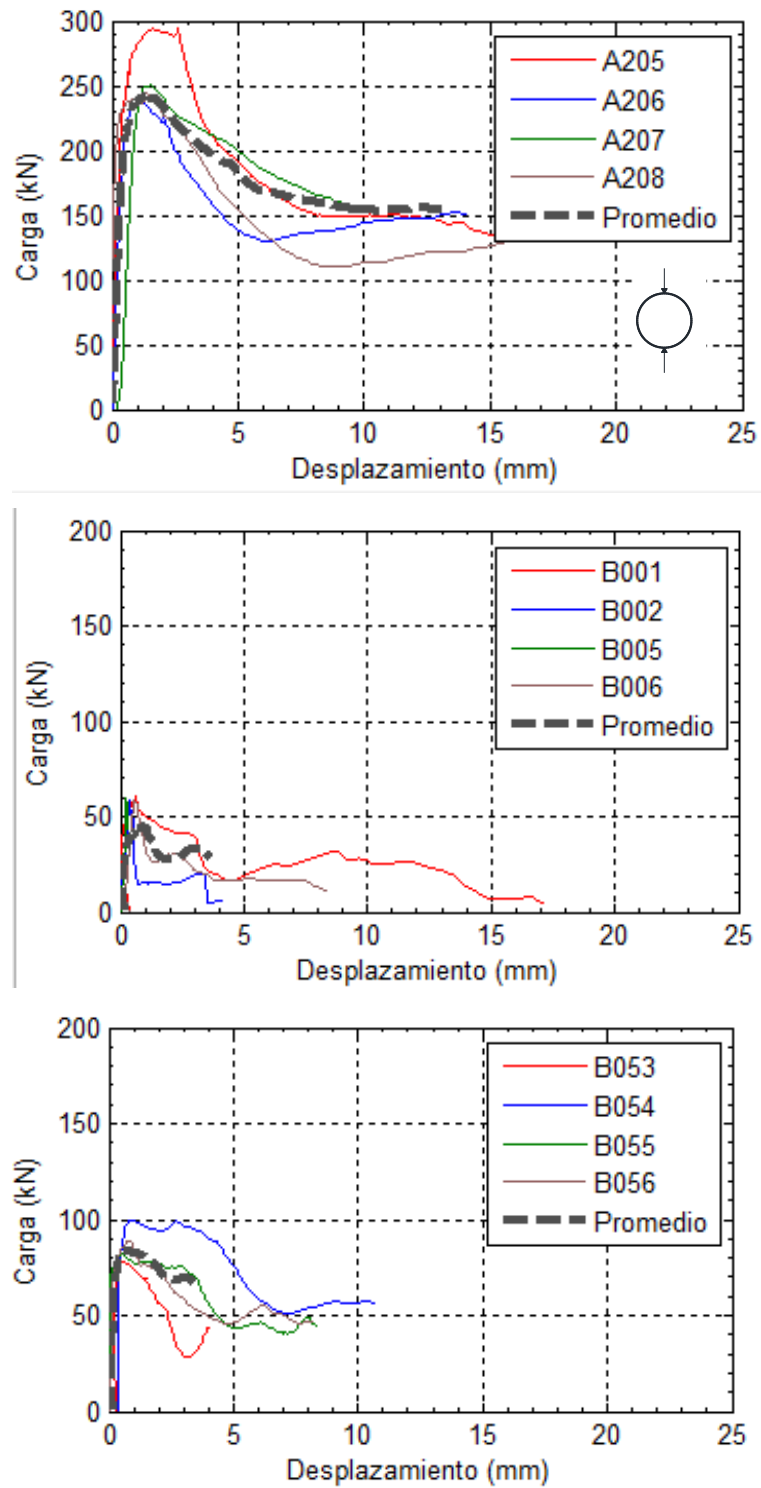


Gráfica 51. Flexión C05, C10 Y C20

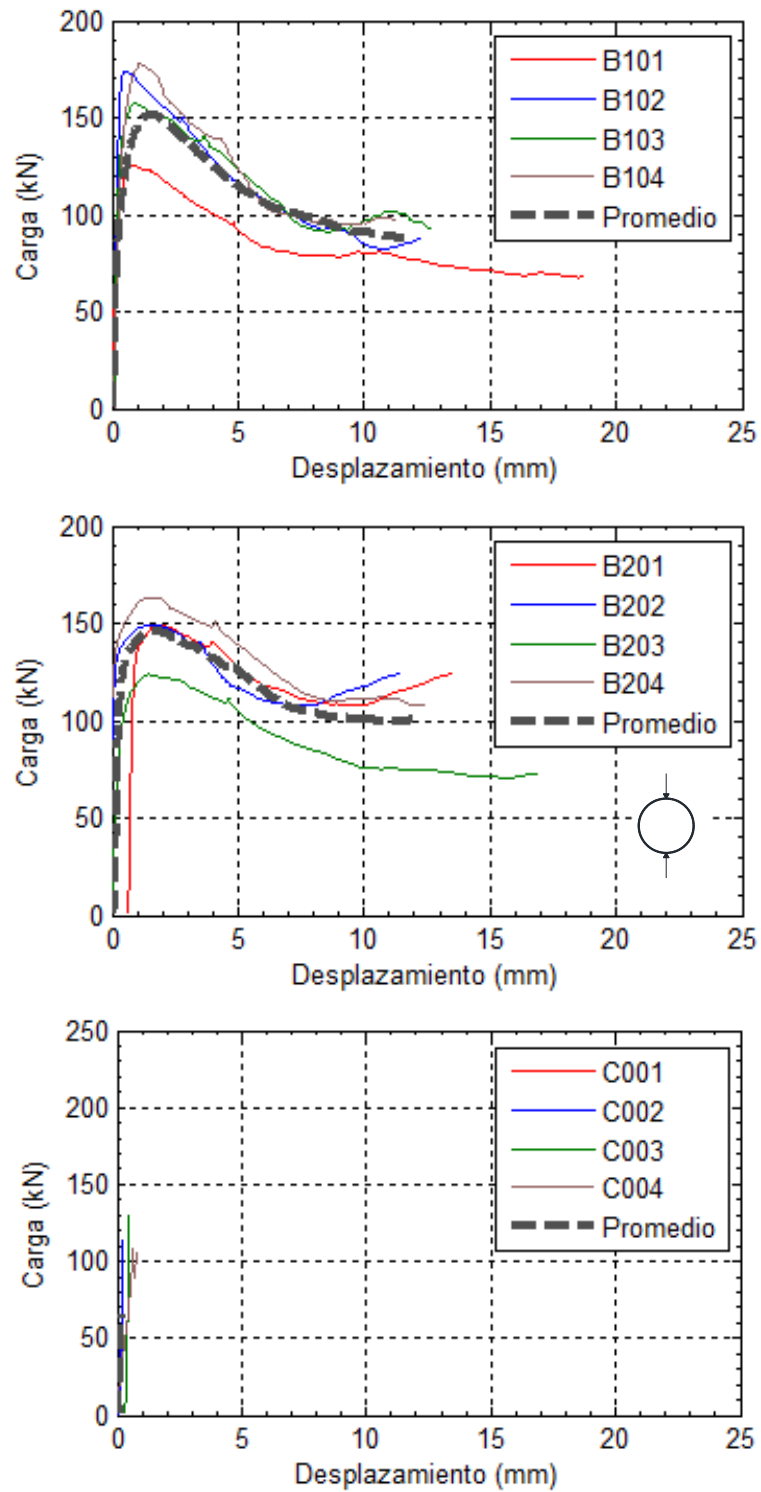
### TRACCIÓN INDIRECTA



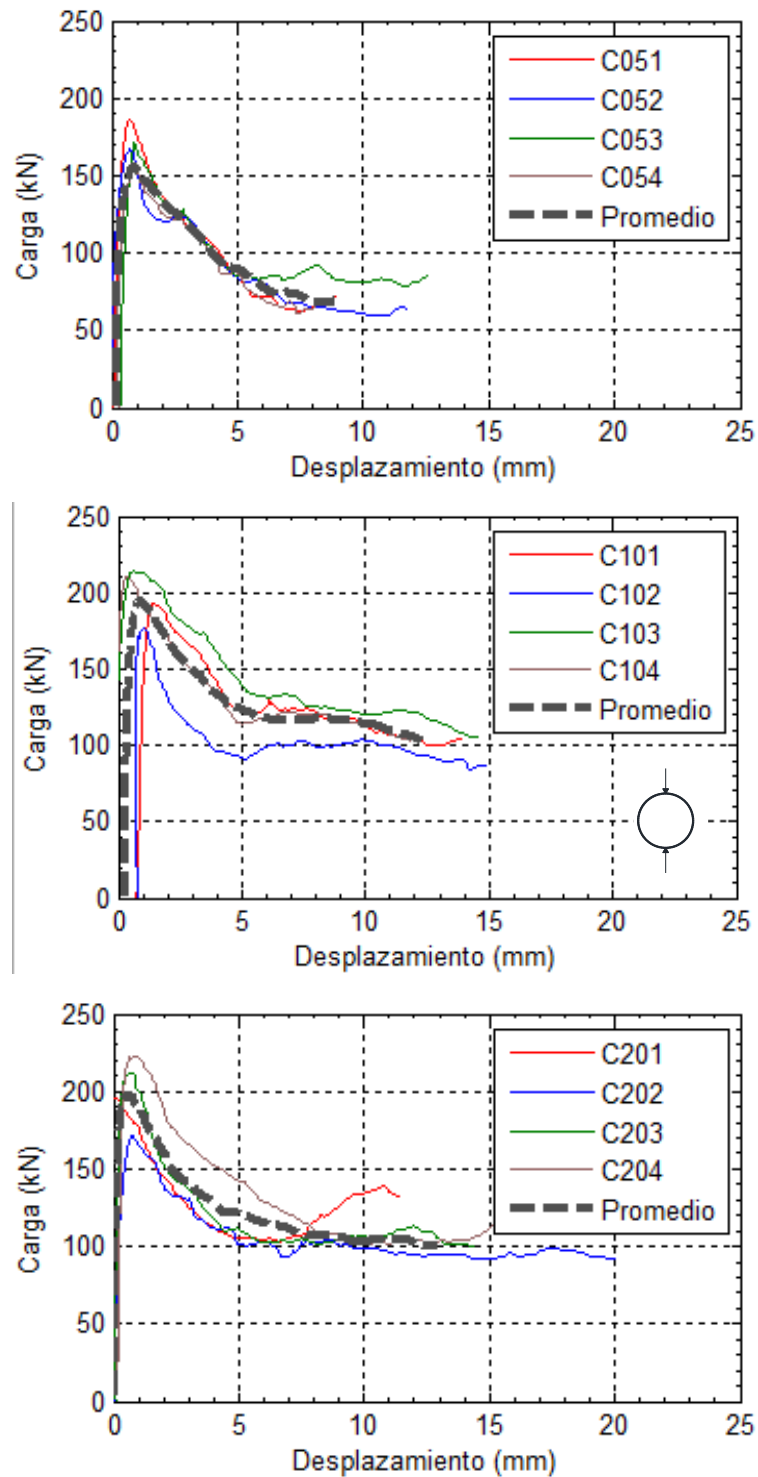
Gráfica 52. Tracción indirecta A00, A05 y A10



Gráfica 53. Tracción indirecta A20, B00 y B05



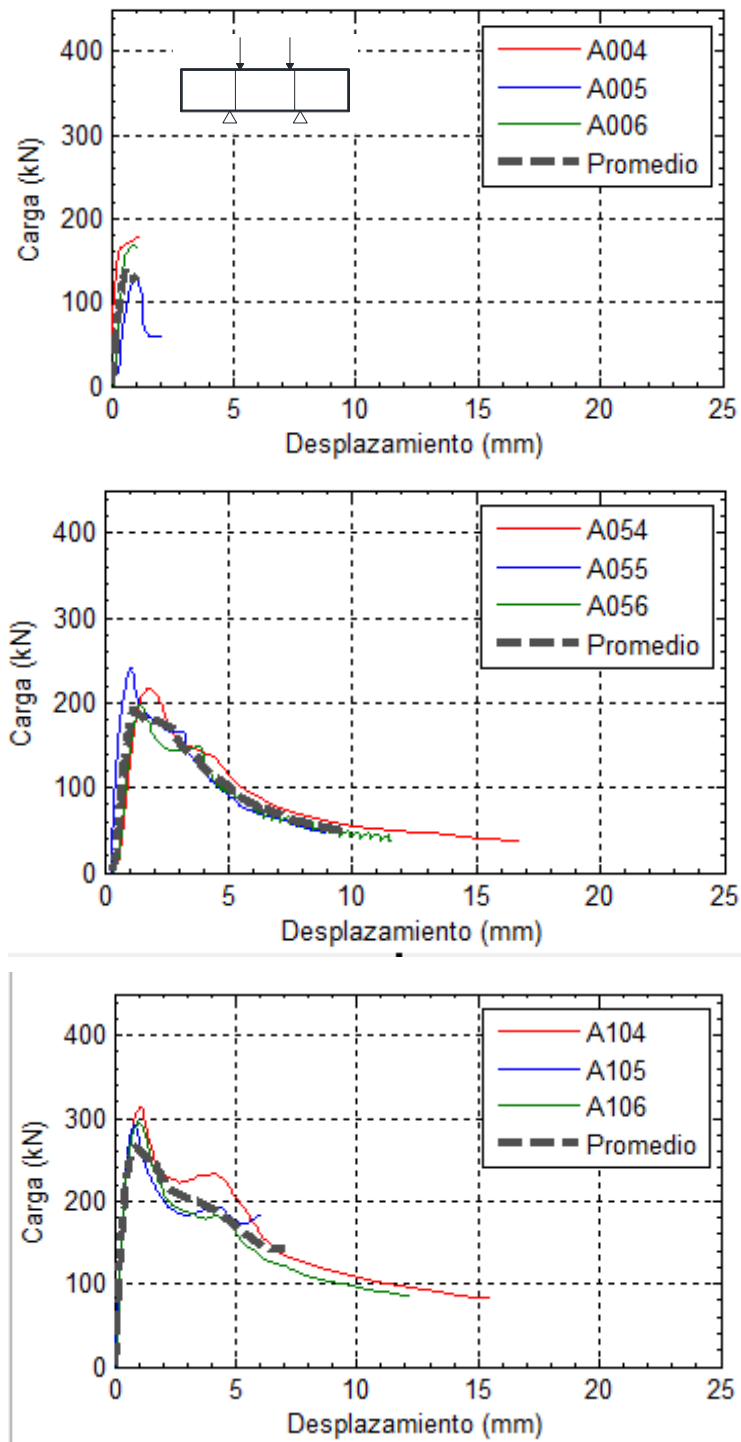
Gráfica 54. Tracción indirecta B10,B20 Y C00



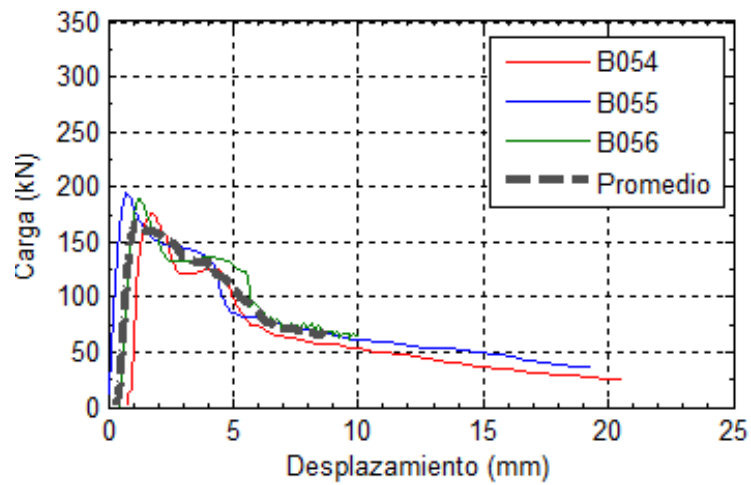
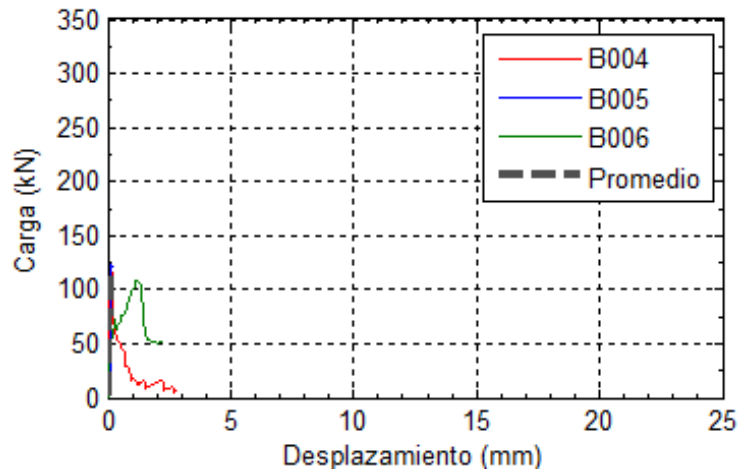
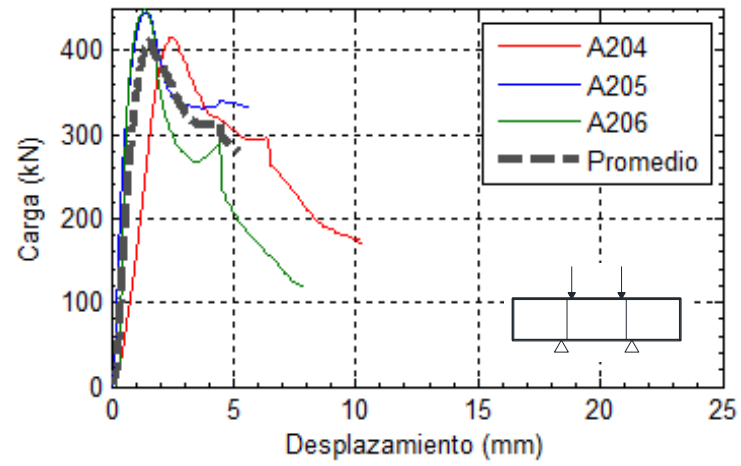
Gráfica 55. Tracción indirecta C05, C10 Y C20



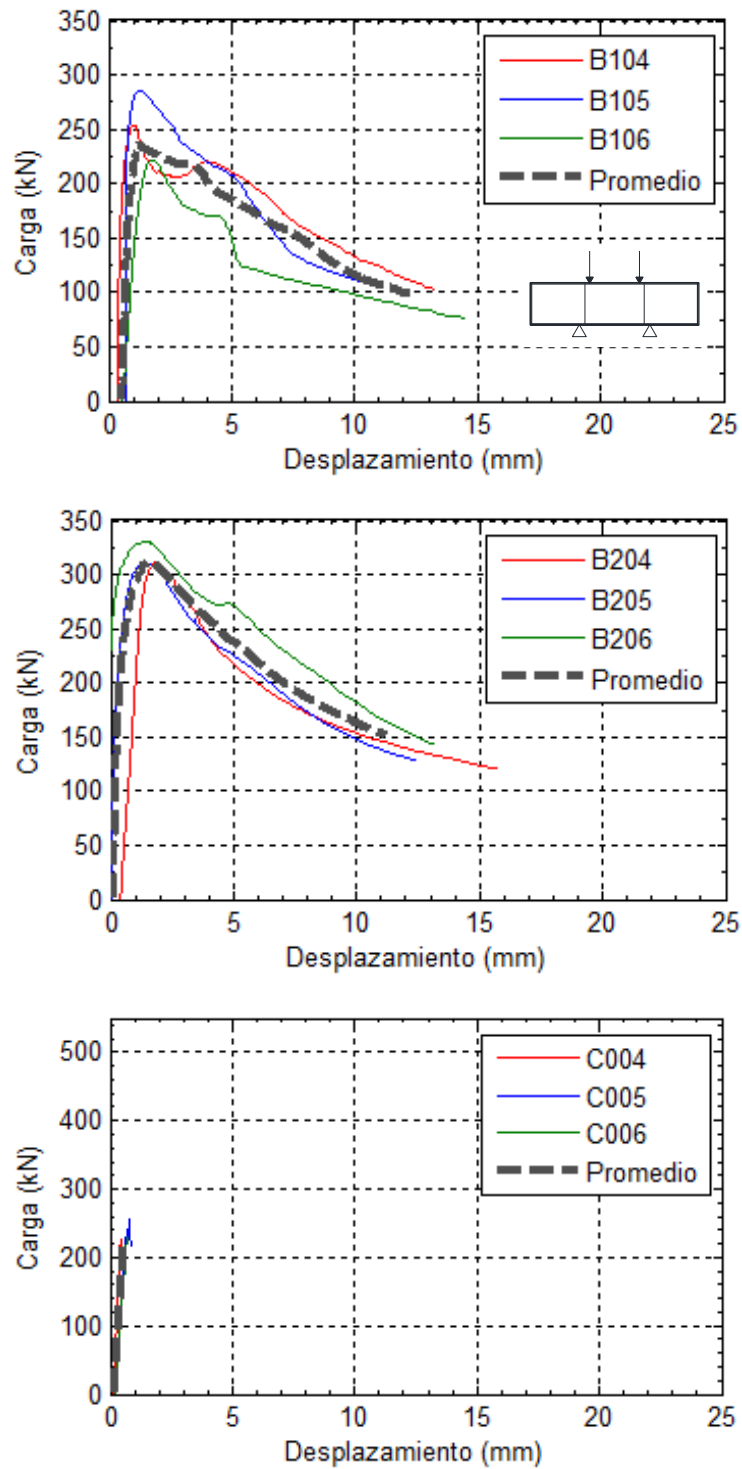
## CORTANTE



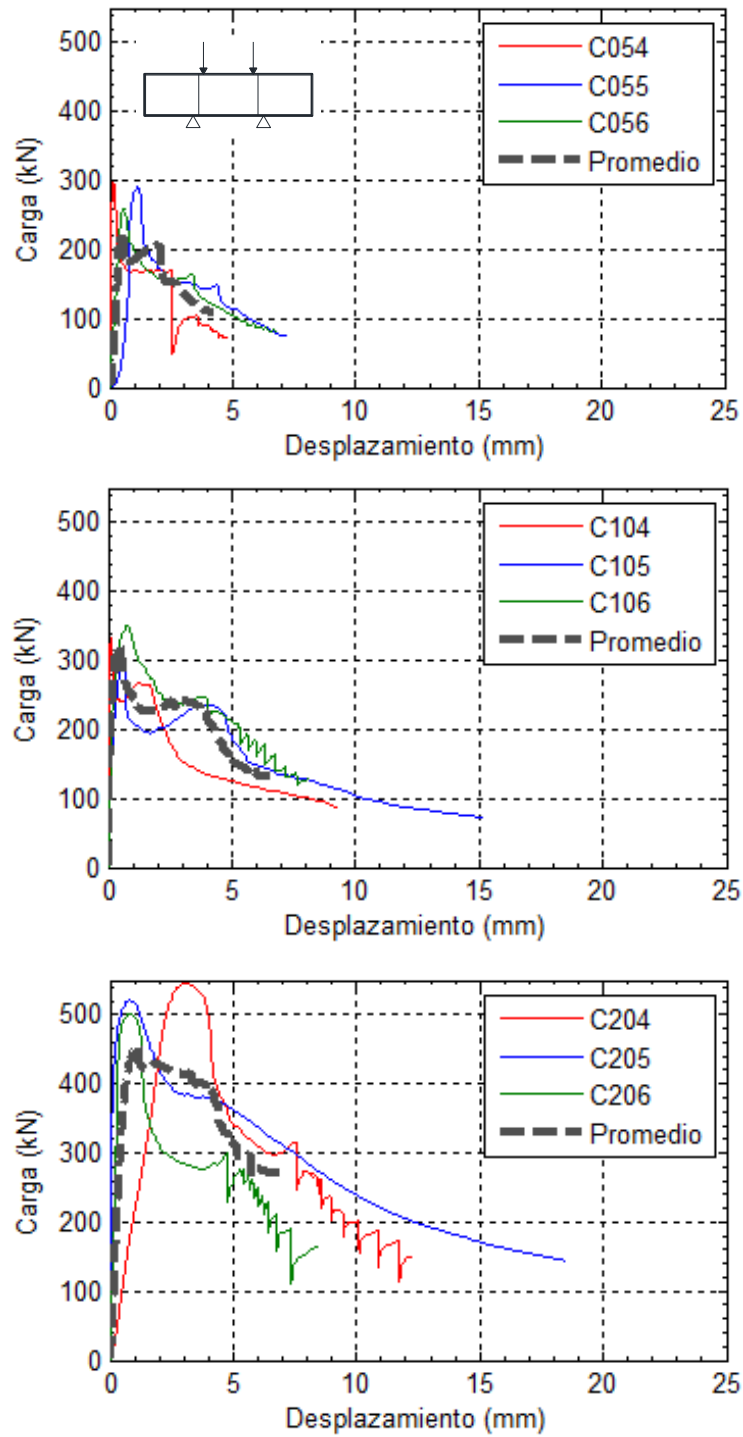
Gráfica 56. Cortante A00, A05 y A10



Gráfica 57. Cortante A20, B00 y B05



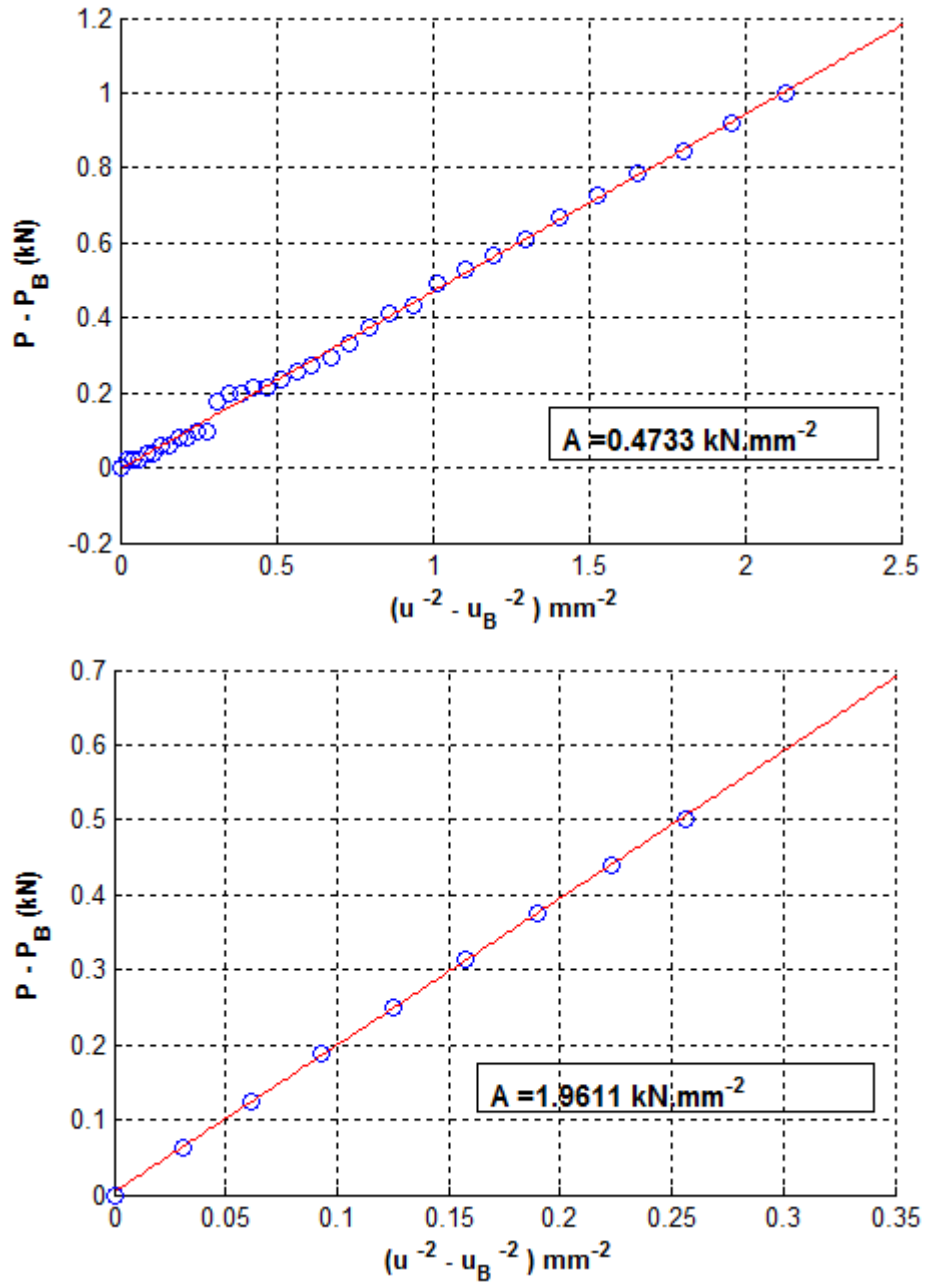
Gráfica 58. Cortante B10,B20 Y C00



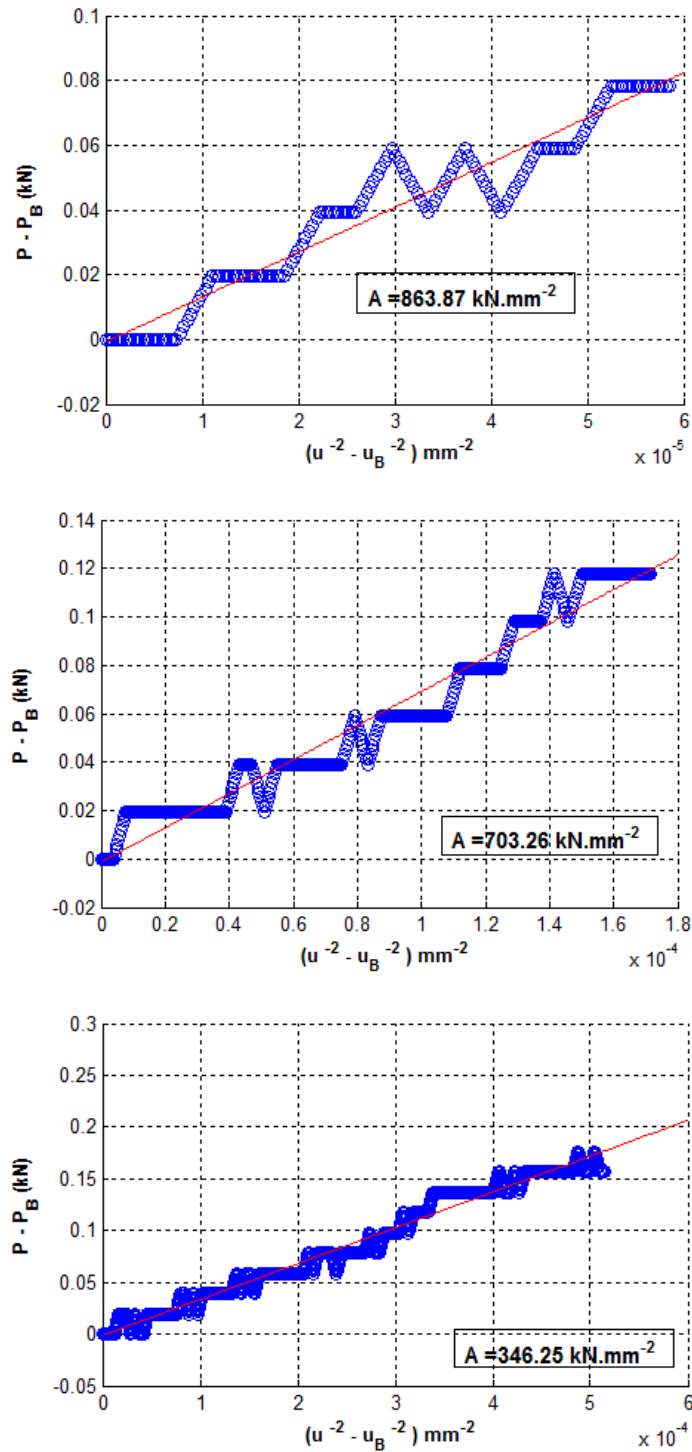
Gráfica 59. Cortante C05, C10 Y C20

### ANEXO D. AJUSTE DE COLA LEJANA

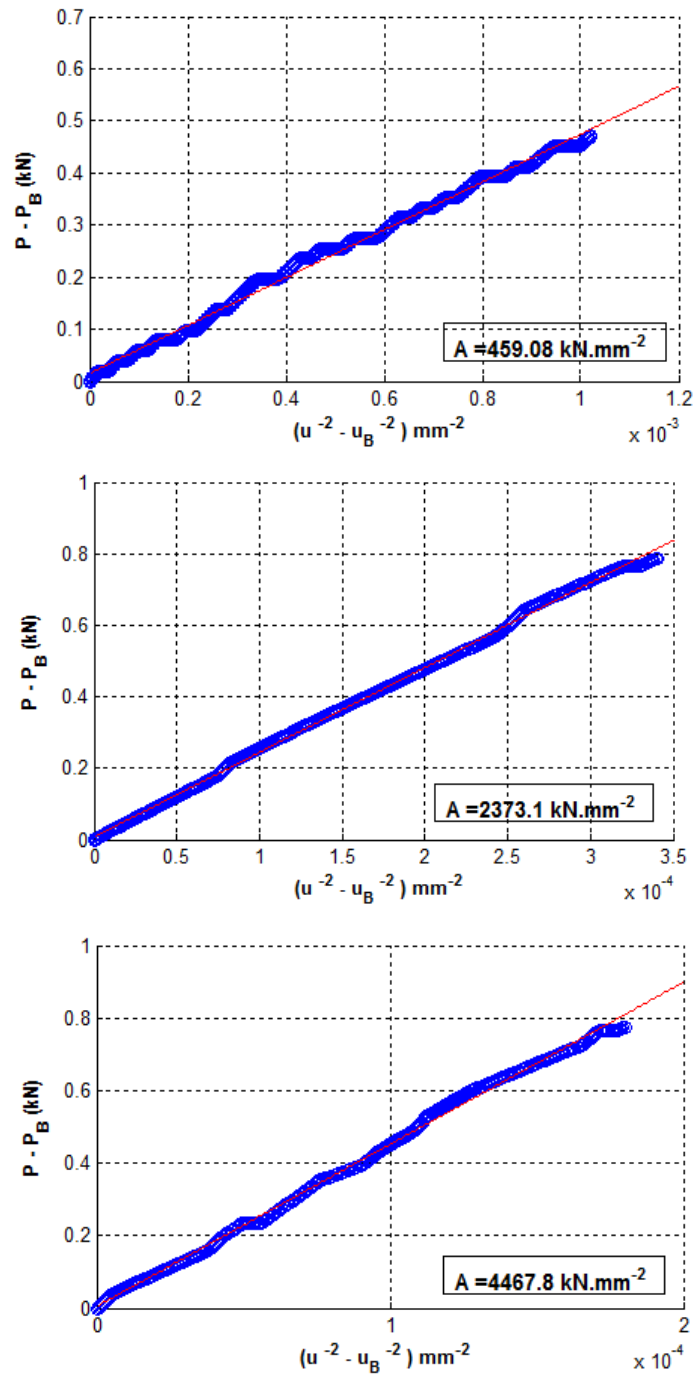
A continuación se presenta el ajuste de cola lejana de acuerdo con (BAŽANT y PLANAS, 1998), realizado mediante ajuste por el método de mínimos cuadrados. Los valores de A se tomaron en cuenta en el numeral 5.5 para la estimación del trabajo y la energía total de fractura a flexión.



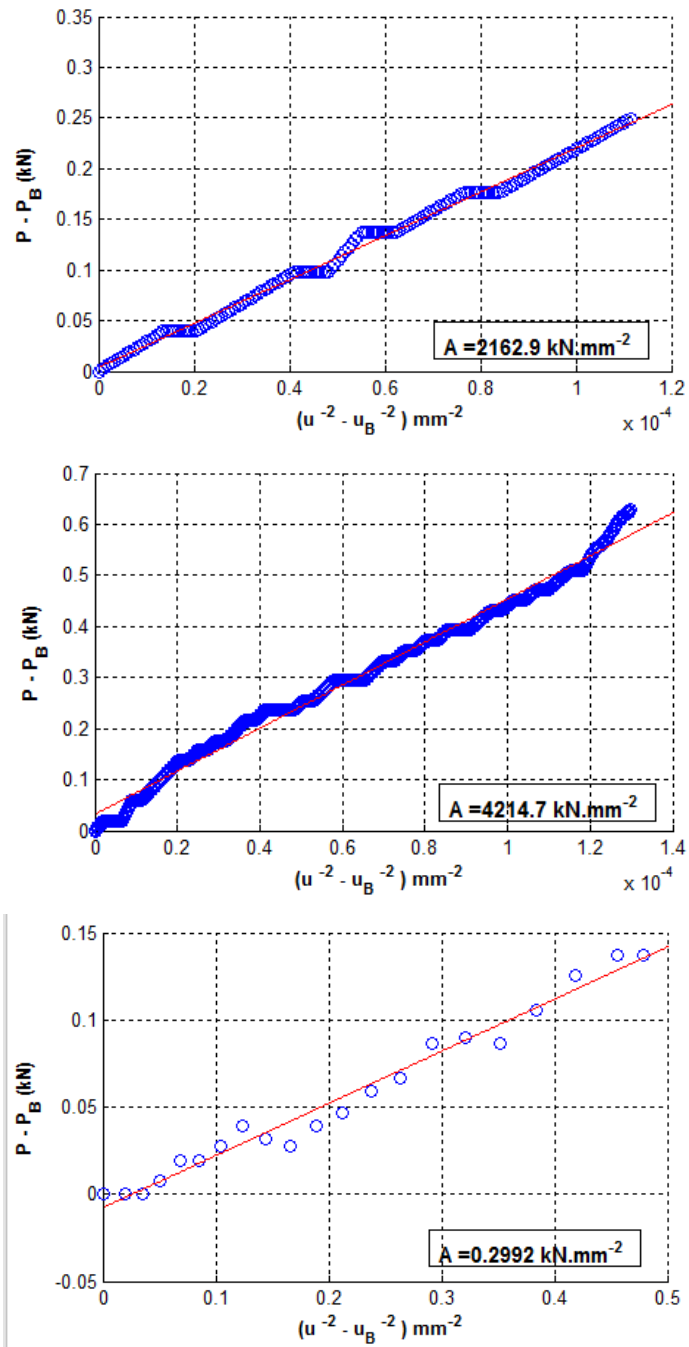
Gráfica 60. Ajuste de cola probeta A00-2 y A00-3



Gráfica 61. Ajuste de cola probeta A05-1, A05-2 y A05-3

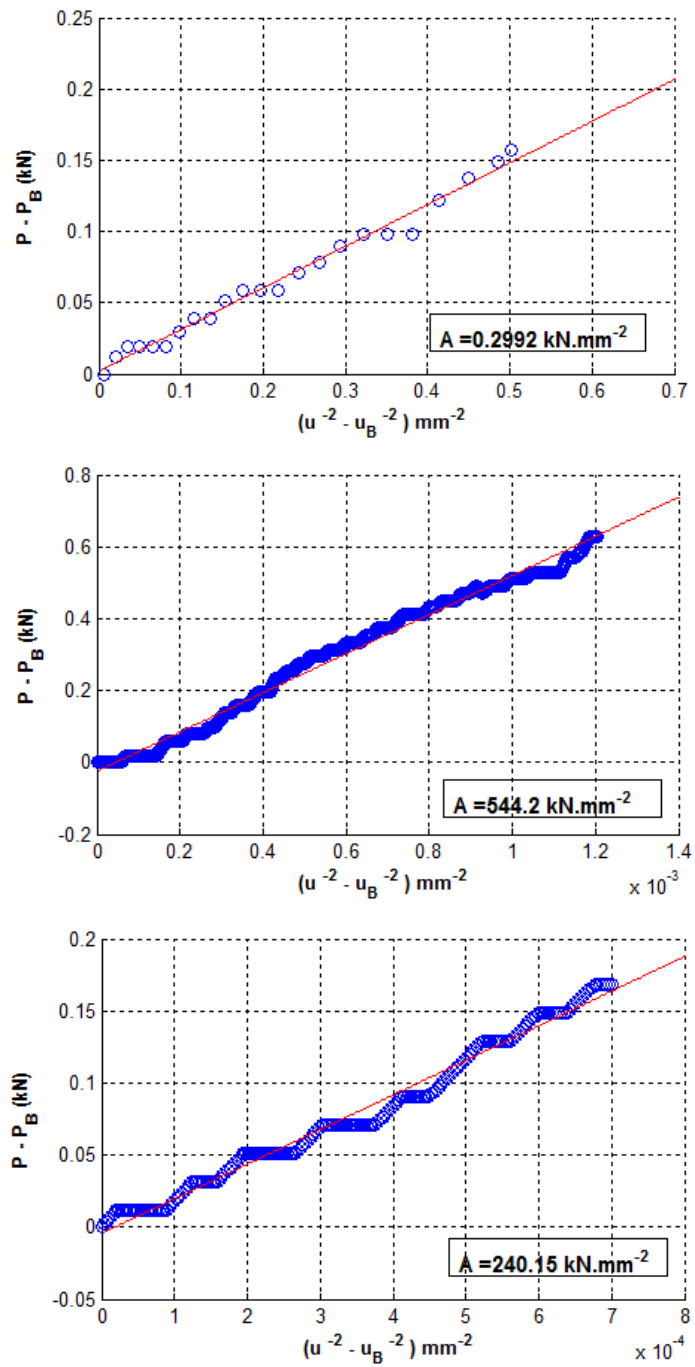


Gráfica 62. Ajuste de cola probeta A10-1, A-10-2 y A20-1

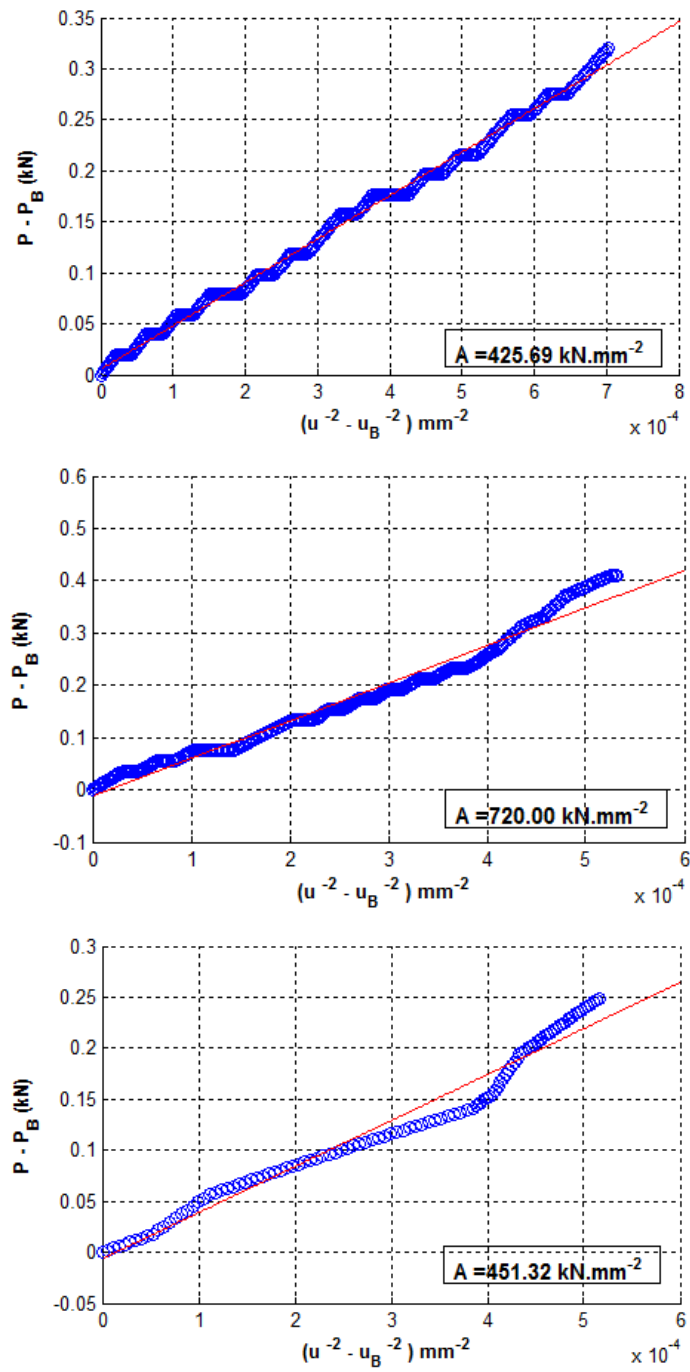


Gráfica 63. Ajuste de cola probeta A20-2, A20-3 y B00-1

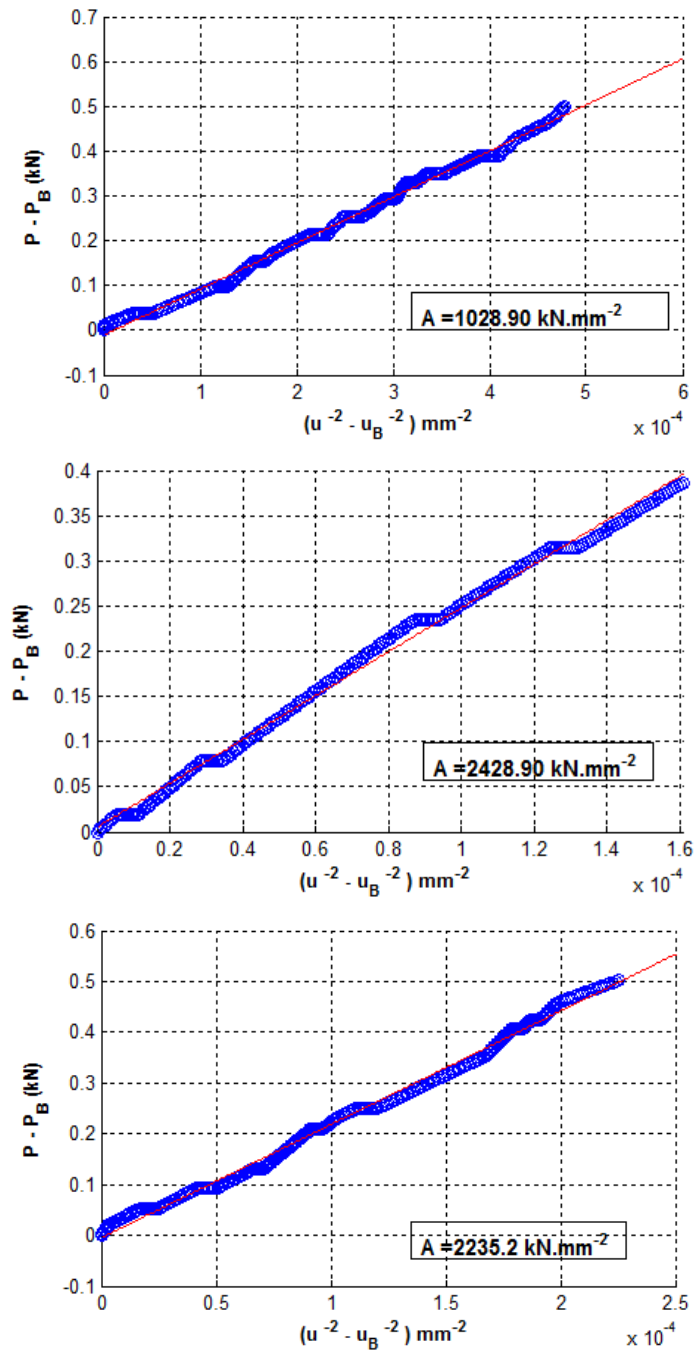




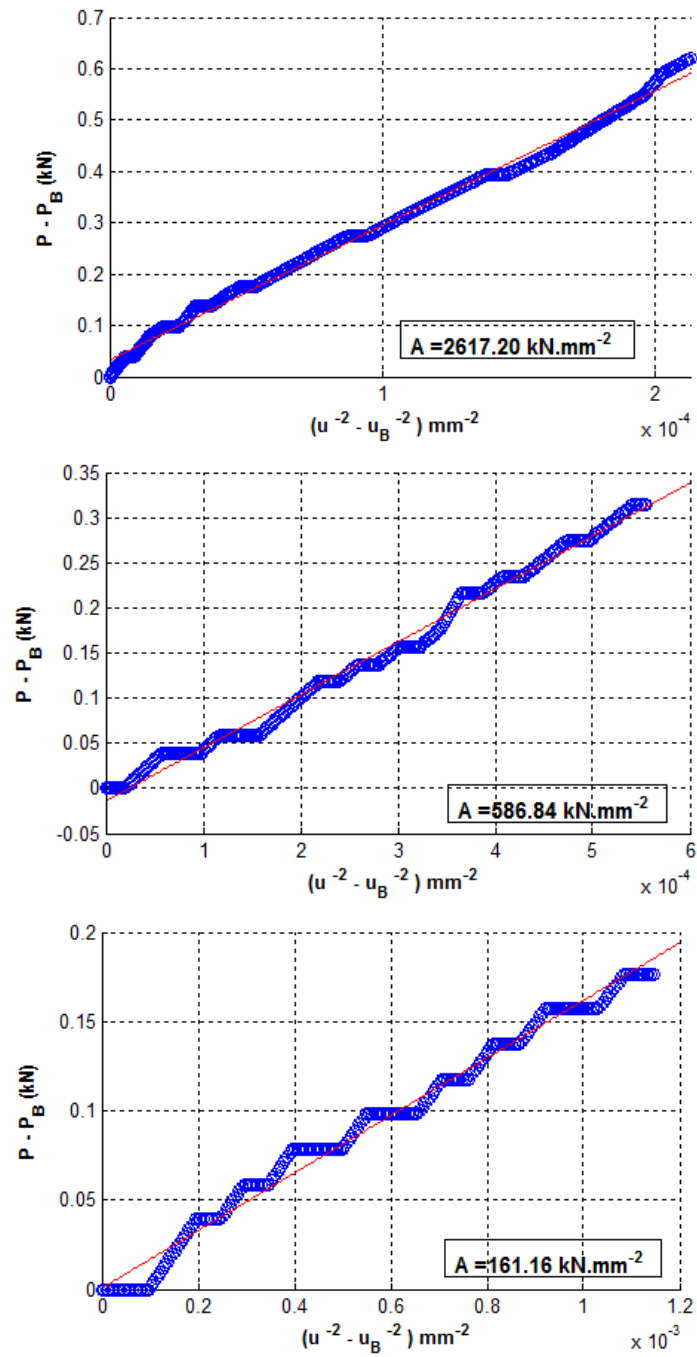
Gráfica 64. Ajuste de cola probeta B00-2, B05-1 y B05-2



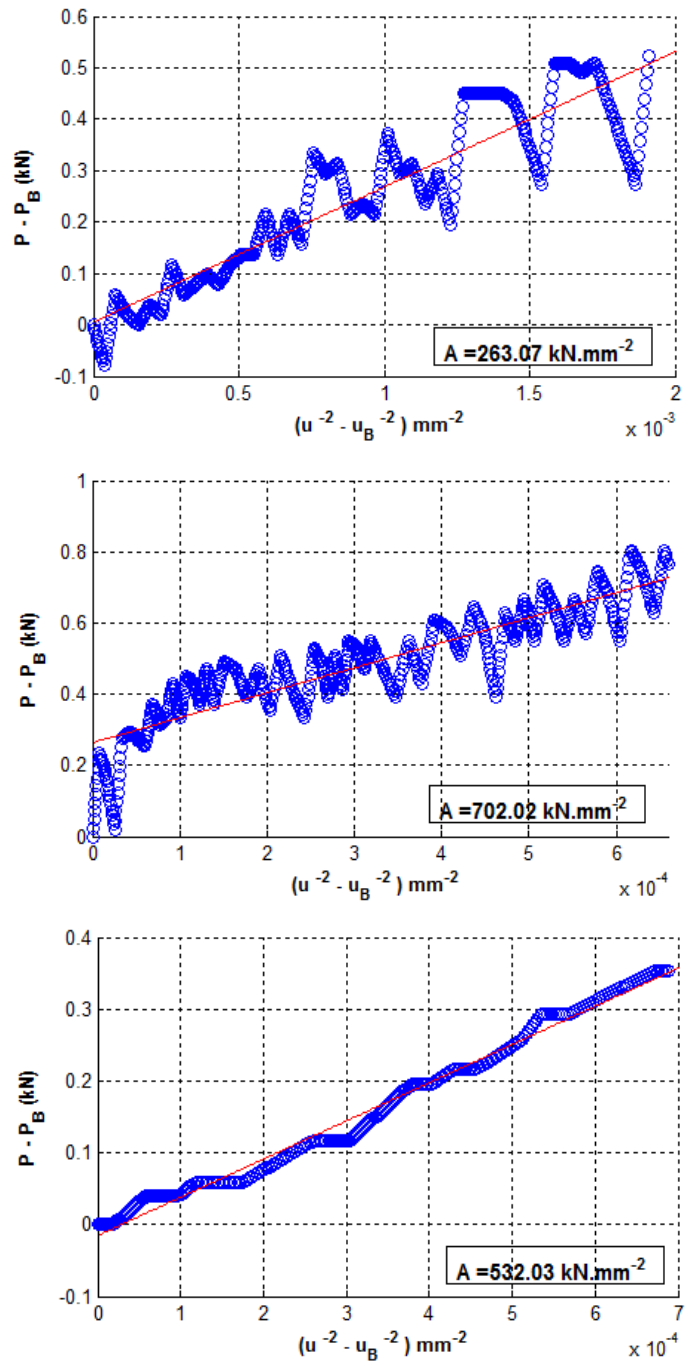
Gráfica 65. Ajuste de cola probeta B05-3, B10-1 y B10-2



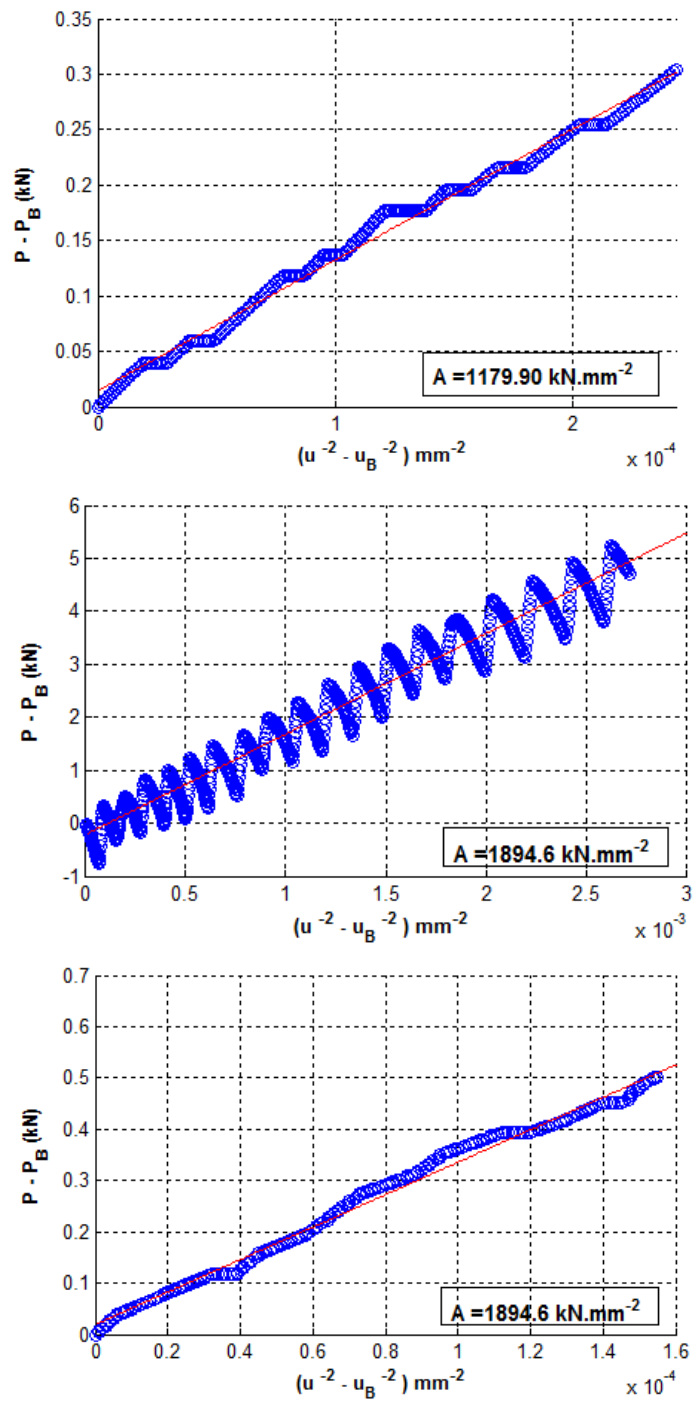
Gráfica 66. Ajuste de cola probeta B10-3, B20-1 y B20-2



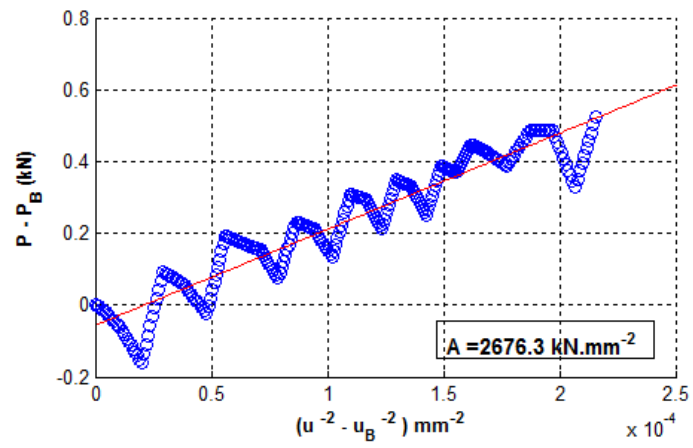
Gráfica 67. Ajuste de cola probeta B20-3, C05-1 y C05-2



Gráfica 68. Ajuste de cola probeta C05-3, C10-1 y C10-2



Gráfica 69. Ajuste de cola probeta C10-3, C20-1 y C20-2



Gráfica 70. Ajuste de cola probeta C20-3

**ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO**



**Fotografía 11. Aspecto de la mezcla con  $p_f = 2,0\%$**



**Fotografía 12. Asentamiento nulo de mezcla con fibra  $p_f = 2,0\%$**





**Fotografía 13. Falla diagonal en un cilindro a compresión**



**Fotografía 14. Aspecto de los cilindros fallados**



Fotografía 15. Falla de cilindro con  $\rho_f = 2.0\%$  antes de estallar



Fotografía 16. Ensayo de flexión estado inicial



**Fotografía 17. Inicio de fisuración**



**Fotografía 18. Colapso de la probeta sin fibra**



Fotografía 19. Estado de equilibrio de una viga fallada a flexión con  $\rho_f = 2,0\%$



Fotografía 20. Aspecto de una viga con  $\rho_f = 2,0\%$  fallada a flexión



Fotografía 21. Aspecto de una viga al final del ensayo de flexión  $\rho_f=0,5\%$



Fotografía 22. viguetas fracturadas a flexión



**Fotografía 23. Aspecto del inicio del ensayo de tracción indirecto**



**Fotografía 24. Aspecto de la probeta al final del ensayo de tracción indirecta**



Fotografía 25. Colapso de probeta de concreto simple a tracción indirecta



Fotografía 26. Aspecto final de una probeta con  $\rho_f = 1,0\%$  fallada a tracción



**Fotografía 27. Colapso de una vigueta a corte sin fibra**



**Fotografía 28. Colapso de una vigueta con  $\rho_f = 0.5\%$**





**Fotografía 29. Daño en los apoyos en una vigueta a cortante**



**Fotografía 30. Daño en los apoyos por aplastamiento  $p_f=0,5\%$**