

APLICACIÓN DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO EN LOSAS  
DE CONTRAPISO PARA VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL

LUISA FERNANDA MENDIETA HIGUERA

CÓDIGO: D7300988

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., ENERO DE 2017

APLICACIÓN DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO EN LOSAS  
DE CONTRAPISO PARA VIVIENDAS DE INTERES SOCIAL

LUISA FERNANDA MENDIETA HIGUERA

CÓDIGO: D7300988

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al  
Título de Ingeniero Civil

Director:

ING. JUAN CARLOS HERRERA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA - FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., ENERO DE 2017

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 06 de febrero de 2017

## DEDICATORIA

A Dios, que siempre me has llevado de la mano, especialmente en los momentos difíciles, a ti mi señor que hoy me regalas la dicha de alcanzar este sueño.

A mi madre, que desde que existo lo has dado todo por mí y porque sea feliz; gracias por tu amor, por tu esfuerzo, por tu apoyo incondicional y por tu fe incansable en mí, eres la razón por la que hoy estoy aquí, esto es para ti, te amo infinitamente.

A la que siempre ha sido mi amiga, cómplice, comadre... a ti hermanita, a los soles de mi vida, mis sobrinas y a mi cuñado, que siempre han estado ahí para mí, que me acogieron en su hogar con inmenso amor; gracias por hacer más ameno este proceso, gracias por las muchas onces sobre el escritorio, por todas esas tardes de no molestar a la tía, por su paciencia y por no dejarme tirar la toalla, los amo con todo mi corazón.

A mi padre amado, por su amor y por enseñarme que uno debe perseguir sus sueños, aunque las cosas se pongan difíciles. A mamita Lu, que siempre has estado pendiente de mí, gracias por tu amor y tus oraciones.

A ti mi Mor, que llegaste en el momento que más lo necesitaba, gracias por tu amor, tu apoyo, tus explicaciones, tu paciencia, por todo tu tiempo, por las tardes enteras que dedicaste a enseñarme y por motivarme a ser mejor cada día.

A toda mi familia y amigos que siempre han estado cerca de mí en este proceso, gracias por su apoyo y paciencia, espero ya no perderme tantos eventos por el mismo motivo, los quiero mucho.

## AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Juan Carlos Herrera, director de proyecto por su constante acompañamiento, asesoría y dedicación durante el desarrollo de la investigación.

Al señor Fabián Pinzón, laboratorista de la UMNG, por su asesoría en cada proceso en el laboratorio.

Al Ing. Felipe Riveros, asistente de investigación de la UMNG, por su asesoría en el procesamiento de datos.

Al Ing. Harold Álvarez, por su constante asesoría conceptual y suministro de información importante para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Sergio Vásquez, por sus asesorías y suministro de información de interés para el desarrollo de este proyecto.

A todos los que participaron directa e indirectamente en el desarrollo de esta investigación.

A la empresa ARGOS. S.A por suministrar el concreto para la realización de los ensayos.

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Planteamiento de la investigación.....</b>	<b>21</b>
	2.1 <i>Formulación del problema .....</i>	22
<b>3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>23</b>
	3.1 <i>Objetivo General.....</i>	23
	3.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	23
<b>4</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Fase exploratoria.....</b>	<b>28</b>
	5.1 <i>Antecedentes de la investigación .....</i>	28
	5.2 <i>Estado del arte .....</i>	30
<b>6</b>	<b>Marco teórico .....</b>	<b>34</b>
	6.1 <i>Concreto.....</i>	34
	6.1.1 <i>Ensayos de concreto en Estado Fresco .....</i>	34
	6.2 <i>Concreto reforzado .....</i>	35
	6.3 <i>Fibras de acero .....</i>	35
	6.3.1 <i>Datos técnicos de las fibras de acero .....</i>	36
	6.3.2 <i>Ventajas de las fibras de acero.....</i>	36
	6.3.3 <i>Trabajo a temprana edad.....</i>	37
	6.3.4 <i>Trabajo de las fibras de acero en concreto endurecido .....</i>	37
	6.3.5 <i>Interacción fibras de acero-concreto.....</i>	38
	6.3.6 <i>Comportamiento mecánico concreto reforzado con fibras de acero.....</i>	38

<b>7</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>39</b>
7.1	<i>Tipo de investigación .....</i>	39
7.2	<i>Etapas de la investigación .....</i>	39
<b>8</b>	<b>Etapa experimental.....</b>	<b>42</b>
8.1	<i>Curado inicial.....</i>	42
8.2	<i>Curado final.....</i>	45
8.3	<i>Preparación de muestras para ensayos.....</i>	46
8.4	<i>Resistencia a la compresión (NTC-673).....</i>	46
8.5	<i>Tensión indirecta (NTC-722).....</i>	47
8.6	<i>Resistencia a la flexión (NTC-2871).....</i>	48
8.7	<i>Absorción de energía, tenacidad del concreto (NTC- 5721).....</i>	49
<b>9</b>	<b>Propiedades físicas.....</b>	<b>50</b>
9.1	<i>Características iniciales del concreto .....</i>	50
9.2	<i>Asentamiento (NTC-396).....</i>	50
9.3	<i>Masa unitaria (NTC-1926).....</i>	52
9.4	<i>Contenido de aire (NTC-1032) .....</i>	53
<b>10</b>	<b>Propiedades mecánicas.....</b>	<b>55</b>
10.1	<i>Resistencia a la compresión (NTC-673) .....</i>	55
10.2	<i>Resistencia a la tensión indirecta (NTC-722).....</i>	59
10.3	<i>Resistencia a la flexión (NTC-2871).....</i>	68
10.4	<i>Absorción de Energía, tenacidad del concreto (NTC -5721).....</i>	88
10.4.1	<i>Comportamiento a 1 mm .....</i>	98
10.4.2	<i>Comportamiento a 3 mm .....</i>	108

<b>11</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>119</b>
11.1	<i>Asentamiento.....</i>	<i>119</i>
11.2	<i>Masa unitaria.....</i>	<i>120</i>
11.3	<i>Contenido de aire.....</i>	<i>121</i>
11.4	<i>Resistencia a la compresión.....</i>	<i>121</i>
11.5	<i>Resistencia a la tensión Indirecta (compresión diametral).....</i>	<i>123</i>
11.5.1	<i>Modulo numérico (Tensión indirecta) .....</i>	<i>123</i>
11.6	<i>Resistencia a flexión (Modulo de rotura - flexión de vigas en tercios medios)</i> <i>128</i>	
11.6.1	<i>Modulo numérico (Flexión en vigas).....</i>	<i>130</i>
11.7	<i>Absorción de Energía, tenacidad del concreto.....</i>	<i>134</i>
<b>12</b>	<b>Comparación con estudio de concreto reforzado con fibras de polipropileno</b>	<b>137</b>
12.1	<i>Asentamiento.....</i>	<i>137</i>
12.2	<i>Masa Unitaria.....</i>	<i>138</i>
12.3	<i>Contenido de aire.....</i>	<i>138</i>
12.4	<i>Resistencia a la compresión.....</i>	<i>139</i>
12.5	<i>Resistencia a la tensión Indirecta (compresión diametral).....</i>	<i>140</i>
12.6	<i>Resistencia a flexión (Modulo de rotura - flexión de vigas en tercios medios)</i> <i>141</i>	
12.7	<i>Absorción de energía, tenacidad del concreto .....</i>	<i>142</i>
<b>13</b>	<b>Análisis económico .....</b>	<b>143</b>
<b>14</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>146</b>
<b>15</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>150</b>
<b>16</b>	<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>151</b>



<b>17 Anexos .....</b>	<b>154</b>
17.1 Anexo A - Paper .....	154
"Aplicación de concreto reforzado con fibras de acero en losas de contrapiso para viviendas de interés social" .....	154

## Lista de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las fibras Dramix RL-45/50-BN.....	36
Tabla 2. Especímenes de concreto fundidos .....	40
Tabla 3. Mezcla para concreto de 21 MPa.....	50
Tabla 4. Asentamiento CS y CRFA .....	51
Tabla 5. Masa unitaria concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero.....	52
Tabla 6. Contenido de aire en concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero	53
Tabla 7. Resistencia a la compresión .....	57
Tabla 8. Cálculo de tensión indirecta.....	60
Tabla 9. Resistencia del concreto a flexión, datos previos a la prueba.....	71
Tabla 10. Resistencia del concreto a flexión, Modulo de rotura.....	73
Tabla 11. Resistencia del concreto a flexión, Absorción de energía (tenacidad) .....	87
Tabla 12. Absorción de Energía.....	89
Tabla 13. Absorción de Energía (Tenacidad), Comportamiento a 1mm .....	98
Tabla 14. Absorción de Energía Comportamiento a 3mm.....	108
Tabla 15. Consistencia del concreto según el nivel de asentamiento .....	119
Tabla 16. Masa unitaria concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero.....	120
Tabla 17. Comparación de valores de Tensión indirecta ( $f't$ ).....	127
Tabla 18. Comparación de valores de Modulo de rotura ( $f'r$ ) .....	133
Tabla 19. Flexión en losas - deflexión, carga y tenacidad .....	135
Tabla 20. Flexión en losas - Comportamiento de losas a 1mm y 3mm .....	136
Tabla 21. Nivel de asentamiento CRFA vs CRFS .....	137

Tabla 22. Masa unitaria CRFA vs CRFS .....	138
Tabla 23. Contenido de aire CRFA vs CRFS .....	138
Tabla 24. Resistencia a la compresión CRFA vs CRFS .....	139
Tabla 25. Resistencia a la tensión indirecta CRFA vs CRFS .....	140
Tabla 26. Resistencia a flexión (módulo de rotura) CRFA vs CRFS .....	141
Tabla 27. Absorción de energía (Tenacidad) CRFA vs CRFS .....	142
Tabla 28. Análisis de costo losa método convencional (malla electrosoldada) .....	143
Tabla 29. Mano de obra losa método convencional (malla electrosoldada) .....	144
Tabla 30. Análisis de costo losa usando fibras de acero .....	144
Tabla 31. Mano de obra losa usando fibras de acero .....	145

## Lista de Gráficos

Gráfico 1. Asentamiento CS y CRFA.....	51
Gráfico 2. Masa unitaria CS y CRFA .....	53
Gráfico 3. Contenido de aire CS y CRFA.....	54
Gráfico 4. Resistencia a la compresión CS y CRFA.....	57
Gráfico 5. Resistencia promedio a la tensión indirecta.....	60
Gráfico 6. Tensión indirecta CS-1 .....	61
Gráfico 7. Tensión indirecta CS-2 .....	62
Gráfico 8. Tensión indirecta CSFT2.....	62
Gráfico 9. Tensión indirecta CSFT3 .....	63
Gráfico 10. Tensión indirecta CF5FT1 .....	63
Gráfico 11. Tensión indirecta CF5FT2.....	64
Gráfico 12. Tensión indirecta CF5FT3 .....	64
Gráfico 13. Tensión indirecta CF9FT1 .....	65
Gráfico 14. Tensión indirecta CF9FT2.....	65
Gráfico 15. Tensión indirecta CF9FT3 .....	66
Gráfico 16. Tensión indirecta CF18FT1 .....	66
Gráfico 17. Tensión indirecta CF18FT2.....	67
Gráfico 18. Tensión indirecta CF18FT3.....	67
Gráfico 19. Tensión indirecta, CS vs CRFA.....	68
Gráfico 20. Esfuerzo a la flexión, módulo de rotura.....	75
Gráfico 21. Esfuerzo a la flexión CS-V1 .....	75

Gráfico 22. Esfuerzo a la flexión CS-V2 .....	77
Gráfico 23. Esfuerzo a la flexión CS-V3 .....	78
Gráfico 24. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V1 .....	79
Gráfico 25. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V2.....	80
Gráfico 26. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V3.....	81
Gráfico 27. Esfuerzo a la flexión CRFAD9-V1 .....	82
Gráfico 28. Esfuerzo a la flexión CRFAD9-V2.....	83
Gráfico 29. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V1.....	84
Gráfico 30. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V2.....	85
Gráfico 31. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V3.....	86
Gráfico 32. Carga – deformación, vigas vs CRFA .....	87
Gráfico 33. Carga – deformación CS-L1 .....	90
Gráfico 34. Carga – deformación CSMALLA-L1 .....	91
Gráfico 35. Carga – deformación CSMALLA-L2.....	91
Gráfico 36. Losas en CS vs CS con malla electrosoldada .....	91
Gráfico 37. Carga – deformación CRFA D5-L1.....	92
Gráfico 38. Carga – deformación CRFA D5-L2.....	93
Gráfico 39. Carga – deformación CRFA D9-L1.....	93
Gráfico 40. Carga – deformación CRFA D9-L2.....	94
Gráfico 41. Carga – deformación CRFA D18-L1.....	94
Gráfico 42. Carga – deformación CRFA D18-L1.....	95
Gráfico 43. Carga – deformación, losas en CS vs CRFA .....	95
Gráfico 44. Carga – deformación, losas en CS-MALLA vs CRFA .....	95

Gráfico 45. Absorción de energía, Tenacidad (J) .....	96
Gráfico 46. Absorción de energía, Flexión (mm) .....	96
Gráfico 47. Absorción de energía, Resistencia (MPa).....	97
Gráfico 48. Carga – deformación a 1 mm CS-L1 .....	98
Gráfico 49. Carga – deformación a 1mm CSMALLA-L1 .....	100
Gráfico 50. Carga – deformación a 1mm CSMALLA-L2.....	101
Gráfico 51. Carga – deformación a 1mm CRFA D5-L1.....	102
Gráfico 52. Carga – deformación a 1mm CRFA D5-L2.....	103
Gráfico 53. Carga – deformación a 1mm CRFA D9-L1.....	104
Gráfico 54. Carga – deformación a 1mm CRFA D9-L2.....	105
Gráfico 55. Carga – deformación a 1mm CRFA D18-L1.....	106
Gráfico 56. Carga – deformación a 1mm CRFA D18-L2.....	107
Gráfico 57. Carga – deformación a 1mm, losas en CS, CS-MALLA vs CRFA.....	108
Gráfico 58. Carga – deformación a 3mm CS-L1 .....	109
Gráfico 59. Carga – deformación a 3mm CSMALLA-L1 .....	110
Gráfico 60. Carga – deformación a 3mm CSMALLA-L2.....	111
Gráfico 61. Carga – deformación a 3mm CRFA D5-L1.....	112
Gráfico 62. Carga – deformación a 3mm CRFA D5-L2.....	113
Gráfico 63. Carga – deformación a 3mm CRFA D9-L1.....	114
Gráfico 64. Carga – deformación a 3mm CRFA D9-L2.....	115
Gráfico 65. Carga – deformación a 3mm CRFA D18-L1.....	116
Gráfico 66. Carga – deformación a 3mm CRFA D18-L2.....	117
Gráfico 67. Carga – deformación a 3mm, losas en CS, CS-MALLA vs CRFA.....	118

Gráfico 68. Tensión indirecta, Valor experimental VS Wafa y Ashour .....	128
Gráfico 69. Absorción de energía o Tenacidad en Vigas.....	129
Gráfico 70. Comparación de valores de Modulo de rotura ( $f_r$ ) .....	133
Gráfico 71. Flexión en losas – $\epsilon$ Max. vs Tenacidad .....	135
Gráfico 72. Flexión en losas - Comportamiento de losas a 1mm y 3mm .....	136
Gráfico 73. Resistencia a la compresión CRFA vs CRFS .....	139
Gráfico 74. Resistencia a la tensión indirecta CRFA vs CRFS .....	140
Gráfico 75. Resistencia a flexión (módulo de rotura) CRFA vs CRFS .....	141
Gráfico 76. Absorción de energía (Tenacidad) CRFA vs CRFS .....	142

## Lista de figuras

Figura 1. Comportamiento en tensión indirecta de concreto reforzado con fibra.....	31
Figura 2. Moldes para elaboración de especímenes.....	42
Figura 3. Toma de asentamiento .....	43
Figura 4. Toma de masa unitaria.....	43
Figura 5. Vigas y losas fundidas .....	44
Figura 6. Cilindros fundidos .....	44
Figura 7. Curado de Cilindros.....	45
Figura 8. Curado de Vigas .....	45
Figura 9. Curado de Losas .....	45
Figura 10. Cilindros a fallar .....	46
Figura 11. Cilindro para compresión .....	46
Figura 12. Cilindro perforado .....	47
Figura 13. Peso de cilindro perforado .....	47
Figura 14. Peso de la viga perforada.....	48
Figura 15. Viga para ser ensayada .....	48
Figura 16. Perforaciones en losa .....	49
Figura 17. Losa preparada para ser ensayada.....	49
Figura 18. Masa unitaria, determinación de masa neta del concreto .....	52
Figura 19. Tipos de falla. Tomado NTC – 673, p 11.....	55
Figura 20. Cilindros para ensayo a compresión .....	58
Figura 21. Ensayo a compresión .....	58



Figura 22. Cilindro Fallado .....	58
Figura 23. T.I, Montaje de marco .....	61
Figura 24. T.I, Cilindro Fallado .....	61
Figura 25. Zonas de fractura del espécimen.....	69
Figura 26. Tenacidad, curva esfuerzo-deformación.....	71
Figura 27. Esfuerzo a la flexión, L/3 en vigas CRFAD5-V1 CRFAD9-V2 .....	72
Figura 28. Esfuerzo a la flexión, viga sobre marco de carga .....	72
Figura 29. Esfuerzo a la flexión, fractura de viga .....	73
Figura 30. Esfuerzo a la flexión, espécimen CS-V-2 fallado.....	74
Figura 31. Esfuerzo a la flexión, especímenes CRFAD9-V1 y CRFAD18-V2 fallados ..	74
Figura 32. Absorción de energía, montaje sobre marco de carga .....	89
Figura 33. Absorción de energía, losa fallada.....	90
Figura 34. Cilindros CS fallados a compresión .....	122
Figura 35. Cilindro dosificación 9 kg/m <sup>3</sup> fallado a compresión.....	122

### Notación y definiciones

CS	= Concreto simple
CRFA	= Concreto reforzado con fibras de acero
CRFS	= Concreto reforzado con fibras sintéticas
T.I.	= Tensión indirecta
VIP	= Vivienda de interés prioritario
VIS	= Vivienda de interés social

## 1 Introducción

El uso de las fibras en materiales de construcción se remonta hasta antes de la aparición del cemento Portland y del concreto. Fibras naturales como pasto, fique, junco y pelo animal han sido tradicionalmente agregadas al adobe para disminuir su tendencia a la fisuración y mejorar el desempeño del material a esfuerzos de tensión (Subcomité de Fibras ICONTEC, 2007); durante los últimos años se han realizado diversos estudios para desarrollar y fabricar tipos específicos de fibras que respondan a las diversas necesidades constructivas, tal como es el caso de las fibras de acero, que se han convertido en una opción de refuerzo que mejora la matriz del concreto cuando este se somete a esfuerzos de flexión, tracción y compresión; además de ofrecer rapidez en la ejecución de obra y economía, características que lo hacen muy atractivo y competitivo en la industria de la construcción.

Investigaciones han demostrado que la adición de fibras de acero mejora las características mecánicas del concreto, ya que, al estar distribuidas por todo el volumen de concreto de manera tridimensional, presentan un mejor comportamiento que el refuerzo convencional (malla electrosoldada o barras de acero) armado en dos direcciones.

La aplicación de fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN en el área de la construcción es bastante variada, pues se aplican a pisos de concreto (industriales y bodegas), recubrimiento de túneles, estabilización de taludes, construcción de piscinas y pavimentos. Ofrecen un importante beneficio, pues reducen directamente los costos de mano de obra y tiempo de ejecución gracias a su sencilla implementación, ya que solo debe mezclarse con el cemento en estado fresco en cualquier mezclador y no requiere de equipo especializado o mano de obra calificada para su manipulación.

El proyecto estuvo encaminado a evaluar los resultados obtenidos al agregar tres dosificaciones diferentes (5kg/m<sup>3</sup>, 9kg/m<sup>3</sup> y 18kg/m<sup>3</sup>) de fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN a un concreto de 21MPa; el programa experimental incluyó el ensayo de 43 especímenes (cilindros, vigas y losas) a partir de las normas técnicas colombianas (NTC): asentamiento (NTC-396), contenido de aire (NTC-1032), masa unitaria (NTC-1926), resistencia a la compresión (NTC-673), resistencia a la tensión indirecta (NTC-722), resistencia a la flexión (NTC-2871), absorción de energía (NTC-5721).

A partir de los resultados obtenidos acerca de las propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero, se procedió a la parte comparativa con las fórmulas que existen para hallar la absorción de energía (tenacidad) analizando el comportamiento de las placas de concreto con el fin de determinar si las dosificaciones utilizadas de fibras de acero pueden igualar el desempeño de la malla electro soldada, y con ello evaluar el cambio de refuerzo principal de la malla electro soldada por las fibras de acero. Los resultados que arrojó la investigación, determinaron las ventajas y desventajas ofrecidas por las fibras de acero si se usan como refuerzo principal en placas de contrapiso.

Se realizó un análisis comparativo de costos para una losa de 36 m<sup>2</sup> x 0.10 de espesor (promedio de una vivienda VIS) con el objetivo de identificar las variaciones en cuanto a costo-beneficio, entre las losas reforzadas con malla electrosoldada y las reforzadas con fibras de acero, y así observar las ventajas económicas que ofrece cada sistema.

## 2 Planteamiento de la investigación

La iniciativa de construir losas de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) como superficie de rodadura para pisos de fábricas, industrias y almacenaje, fue tomada de los excelentes resultados que reflejó esta práctica en la construcción de losas para pavimento. En estas losas se detectó que la adición de fibras de acero al concreto mejoraba su desempeño, debido a que las fibras refuerzan la matriz frágil y quebradiza del mismo. De esta manera, las fibras de acero inciden en el comportamiento del concreto ante esfuerzos de tensión, aumentan su módulo de ruptura y su capacidad de absorber energía, disminuyen su desgaste y fisuración, en general, mejoran sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Hadi, 2008) y (Seddik y Bencheikh, 2009).

En el caso particular de las losas de contrapiso (losas que se apoyan directamente sobre el suelo mejorado), la adición de fibras ha permitido no solo reducir las juntas de construcción, dilatación y contracción, sino construir losas de dimensiones más grandes, eliminar los pasadores en las juntas y optimizar procesos constructivos, lo que disminuye el tiempo de ejecución de las obras.

En Colombia, la problemática habitacional es fundamentalmente económica: las familias no cuentan con suficientes ingresos para acceder a este bien en condiciones de mercado, y el mercado por su parte, no produce suficientes unidades de bajo costo para atender a las familias (Hena Padilla, 2011). Es por esta razón que es de gran importancia estudiar métodos constructivos que permitan producir viviendas VIS (Vivienda de Interés Social) seguras, resistentes y confiables a bajo costo, puesto esto repercutiría directamente en el bienestar de las familias, brindándoles la posibilidad de adquirir una unidad de vivienda digna, y que esté al alcance de su presupuesto.

## 2.1 Formulación del problema

Teniendo en cuenta lo anterior, y con el ánimo de reducir no solo los tiempos de ejecución, sino además los costos de las losas construidas con la tradicional malla electrosoldada, se plantean los siguientes problemas de investigación:

*"¿Cuál es la relación entre la adición de diferentes dosificaciones de fibras de acero y la variación en las propiedades físicas (manejabilidad, contenido de aire) y mecánicas (compresión, módulo de elasticidad, flexión, tensión) de un concreto con resistencia a compresión de 21 MPa?"*

*"¿Es posible reemplazar la malla electrosoldada de 150×150×5mm como refuerzo principal en losas de contrapiso en vivienda de interés social (VIS), por un concreto reforzado con fibras de acero, cuyo desempeño estructural es igual o superior al observado en losas con malla?"*

### 3 Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de losas de contrapiso de 0.10 m de espesor, fabricadas con concreto reforzado con tres dosificaciones de fibras de acero (5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup>), como alternativa constructiva para viviendas de interés social u otro tipo de estructura en donde las cargas de servicio sean iguales o menores que 500 kg/m<sup>2</sup>.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de un concreto con resistencia a la compresión de 21 MPa reforzado con fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN
- Establecer la relación entre la adición de las dosificaciones de las fibras de acero Dramix (5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup>) y la variación en las propiedades físicas (asentamiento, manejabilidad y contenido de aire) y mecánicas (resistencia a compresión, tensión indirecta, resistencia a la flexión, módulo de rotura y absorción de energía) en un concreto de 21 MPa para losas de contrapiso de 0,1 m de espesor.
- Construir losas cuadradas en concreto de 0.6 m de lado y 0.1 m de espesor, con varias configuraciones de refuerzo: (a) sin refuerzo, (b) con refuerzo de malla electrosoldada (barras de  $\varnothing 0.05$ m, espaciadas 0.15m en dos direcciones - cuantía equivalente de 1.3 cm<sup>2</sup>/m en cada dirección) y (c) con refuerzo en fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN utilizando tres dosificaciones (9,15 y 18 kg/m<sup>3</sup>)

- Realizar un análisis entre el desempeño estructural de las losas de 0.1 m de espesor, con las configuraciones de refuerzo indicadas en el objetivo anterior; que se determinará con la curva fuerza-deformación.
- Determinar y evaluar la relación costo-beneficio de la adición al concreto de fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN para fabricar losas de contrapiso, y comparar los resultados con aquellos asociados con la construcción convencional en donde se utiliza acero figurado o mallas electrosoldadas.



#### 4 Justificación

El gobierno de Colombia, a través del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio tiene como objetivo para este cuatrienio construir un millón de viviendas nuevas para dotar de vivienda digna a muchas familias colombianas de clase menos favorecida que actualmente no cuentan con los recursos para adquirir un inmueble.

Para ello, se han establecido estrategias tales como la reingeniería al Sistema de Subsidios integrando la oferta y la demanda de Vivienda de Interés Prioritario y Social "VIP y VIS", la promoción de esquemas de financiación para hogares independientes de bajos ingresos (fomento al ahorro voluntario programado), la financiación de largo plazo para adquisición de vivienda (Cobertura a la tasa de interés de créditos hipotecarios y contrato de leasing habitacional-FRECH), y , una de las más importantes, la Sanción de la "ley de vivienda de interés prioritario", en la que se invertirán 1.46 billones de pesos en pro de la clase menos favorecida. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio , 2014)

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que se están realizando, estas iniciativas no son suficientes, ya que el déficit de vivienda se estima en más de 3 millones de viviendas para cerca de 18 millones de colombianos que viven en condiciones deplorables y carecen de una vivienda digna. (DANE, 2005)

La disminución de los costos de ejecución y construcción de VIS se ha convertido en política de gobierno, un costo razonable les permitirá a las clases más vulnerables adquirir una vivienda digna. El gobierno colombiano, a través de Colciencias, promueve investigaciones con propuestas alternativas e innovadoras de materiales que permitan construir soluciones de vivienda más económicas. Estas políticas llevaron a la inclusión de las viviendas de bahareque encementado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-resistente, NSR-10.

Encontrar nuevos procesos de fabricación que combinen materiales conocidos puede ser una buena alternativa, si se encaminan no sólo al aprovechamiento de cada material, sino también a que el producto final cumpla con los parámetros de calidad y seguridad. Adicional a la combinación de materiales, la industrialización del proceso es ideal para cualquier construcción del tipo VIS, pues ahorra tiempo y se maximizan rendimientos, factores directamente relacionados con la economía de la construcción.

Actualmente, los procesos constructivos VIS buscan ser industrializados (disminuir costos); sistemas como el “outinord” han tenido gran demanda en este tipo de construcción; sin embargo, están enfocados a la construcción de edificios de mediana y gran altura, con utilización limitada o nula en la cimentación de la vivienda de baja altura. En estas viviendas, el proceso de construcción de las losas de contrapiso aún se realiza de manera tradicional, con el sistema de malla electrosoldada o barras corrugadas; estos sistemas no sólo afectan los rendimientos constructivos en la obra, sino que tienen una serie de inconvenientes como agrietamiento y micro-agrietamiento, que se producen cuando el concreto se contrae en su proceso de fraguado, ya que las barras tratan de evitar el movimiento natural de la masa (Lambrechts, 2011).

El concreto reforzado con fibra de acero (CRFA) reduce significativamente los desperdicios y brinda mayor facilidad en su proceso de colocación, debido a que la fibra, al ser una adición al concreto, no requiere de cortes y figurados como el acero convencional. Por otro lado, cuando se utiliza CRFA se presentan otras ventajas importantes; por ejemplo, no se requiere fabricación o compra de elementos que garanticen el recubrimiento del acero, el almacenamiento es más fácil porque demanda menos espacio y adicionalmente requiere menos cuidados, puesto que no se oxidan o deterioran cuando se almacenan, ya que las fibras de acero son empacadas adecuadamente.

Las ventajas y beneficios que el CRFA podría brindar a la construcción de VIS, es una alternativa atractiva para mejorar el proceso constructivo de las losas de contrapiso; por lo tanto, se considera que el análisis de los resultados de los ensayos realizados, necesario para obtener un soporte técnico que sustente su uso y brinde parámetros prácticos para evaluar el desempeño de CRFA en losas de contrapiso para VIS.

## 5 Fase exploratoria

### 5.1 Antecedentes de la investigación

El estudio del concreto reforzado con fibras metálicas (CRFA) ha sido desarrollado por distintos entes internacionales, entre los cuales se destaca el American Concrete Institute (ACI por sus siglas en inglés), especialmente el Comité 544, del cual existen distintas investigaciones en cuanto a propiedades de resistencia, deformación, condiciones de servicio y durabilidad de concreto reforzado con fibras, tanto metálicas como sintéticas (ACI, 2009) . Además, se cuenta con publicaciones de la Sociedad del Concreto (The Concrete Society, 2003; 2006) y de la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM, 2000), entes europeos que también han desarrollado numerosas investigaciones en cuanto a este tema y se han encargado de tratar de unificar la normativa de diseño bajo un mismo concepto.

Existen algunas investigaciones acerca del uso de fibras de acero como refuerzo para concreto; Khaledmarar y otros (2001) realizaron una investigación utilizando fibras de acero con extremos en forma de gancho y tres diferentes medidas (l/d: longitud /diámetro); 30/0.50mm, 60/0.80mm y 50/0.60mm que se añadieron en 4 volúmenes de fibras a cada mezcla, con un porcentaje del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% por volumen de hormigón, con el objetivo de determinar una relación entre la tenacidad y resistencia al impacto de hormigones reforzados con fibras (HSFRC), comparándolos entre sí, ya que estas dos propiedades son una medida de la capacidad de absorción del material, y la resistencia al impacto está relacionada con la tenacidad y la capacidad de deformación.

Otra es la propuesta de Hadi (2008), quien compara las propiedades de las losas de hormigón cuando se añaden dos tipos de fibras. Las fibras de acero y fibras de polipropileno en la relación volumétrica de 0,5% y 1,0% se añadieron a cuatro especímenes de losa ( $0.82 \times 0.82 \times 0.08$ ) y un espécimen sin fibras, que fueron apoyados por cuatro rodillos en sus bordes y se aplicó la carga en el centro de las losas; se concluyó que la adición de un 1% en volumen de acero fibras tenían mejor efecto sobre la ductilidad de las losas, y además, los resultados mostraron que la presencia de fibras de acero y de polipropileno aumentaban la resistencia del hormigón, siendo las fibras de acero las de mayor efecto.

Se evidencia la investigación de Mármol Salazar (2010), quien evalúa las características mecánicas de los hormigones con fibras de acero (Flexotracción, compresión, tenacidad-fatiga y resistencia al impacto) y concluye que, a compresión y flexo tracción, la presencia de fibras de acero cambial el comportamiento de una rotura frágil a una dúctil.

Por último se presenta un estudio realizado en la ciudad de San José - Costa Rica, por Navas y Rojas (2010), donde la investigación experimental se basó en determinar la capacidad residual del SFRC (concreto reforzado con fibras) utilizando una resistencia de concreto específica ( $f'c = 28$  MPa) con tamaño máximo nominal de agregado de 19 mm y un tipo de fibra (Wirand® FF1) en especímenes tipo viga, con el objetivo de comprobar el comportamiento mecánico de estos elementos y determinar si los datos de las especificaciones técnicas tienen validez; los ensayos se realizaron en vigas moldeadas de  $0.15\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.55\text{m}$  y falladas a flexión.

## 5.2 Estado del arte

Existen abundantes investigaciones sobre concretos reforzados con fibras de acero (CRFA). El tema tomó gran interés entre los investigadores, debido a las ventajas significativas que exhibían los concretos reforzados con fibras en comparación con los concretos convencionales. De esta manera, desde los años 80, los fabricantes de las fibras de acero impulsaron investigaciones que se enfocaron en estudiar las diferentes propiedades de los CRFA en estados fresco y endurecido.

En 1989, Beckett y Humphreys realizaron una investigación en losas cuadradas de 3.0 m de lado y 0.15 m de espesor apoyadas sobre un suelo con módulo de reacción  $K=4000 \text{ kN/m}^3$ , utilizando concreto de 28 MPa. En el programa experimental de la investigación se varió la dosificación de fibras y la relación de aspecto (longitud/diámetro) de las fibras. La respuesta de los especímenes con CRFA fue comparada con las respuestas de un testigo patrón sin fibra y de un testigo con malla electrosoldada. Los resultados permitieron comprobar que la adición de fibras de acero incrementa la carga final de rotura entre 10% y 30%, según la dosificación de las fibras. Adicionalmente, se observó que la adición de la fibra mejora el desempeño del elemento después de la formación de la primera fisura, y mejora la tenacidad y la resistencia ante esfuerzos de tensión en las losas.

En 2003, Bischoff et al. (Hena Padilla, 2011) realizaron una investigación en losas de concreto con sección cuadrada de 1.20 m de lado y 0.15 m de espesor, apoyadas sobre un suelo con  $K=3000 \text{ kN/m}^3$ , utilizando concreto con resistencia a compresión que varió entre 28 MPa y 34 MPa. La dosificación y la relación longitud/diámetro de la fibra fueron  $30 \text{ kg/m}^3$  y 80, respectivamente. En el estudio se comparó la capacidad de las fibras de acero y barras de acero liso de 16 mm de diámetro con 0.40 m de longitud (dovelas), en transferir carga vertical estática

y cíclica a través de la junta de dilatación. En el estudio se observó que la fibra era capaz de transmitir 90% de las cargas antes de la falla, es decir 5% más carga que las dovelas. Al degradarse la junta, también se observó que las dovelas no transferían cargas mientras que las fibras transferían 45%.

En 2010, (Mendoza, 2010) realizaron una investigación sobre la influencia de agregar fibras de acero en las propiedades de un concreto en estado plástico y endurecido a edades de 7 y 28 días. En el programa experimental se evaluó un concreto de 42 MPa, al cual se le adicionaron fibras de acero en tres dosificaciones (1, 3 y 5 kg/m<sup>3</sup>). En el estudio se determinaron las propiedades físicas y mecánicas en estado fresco, tales como, contenido de aire, masa unitaria y agrietamiento por contracción plástica; y en estado endurecido, tales como, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson, resistencia a tensión (ver Figura 1), tenacidad, resistencia al impacto y contracción por secado. En general, se observó que todas las propiedades medidas del CRFA fueron superiores a aquellas medidas en el concreto simple.

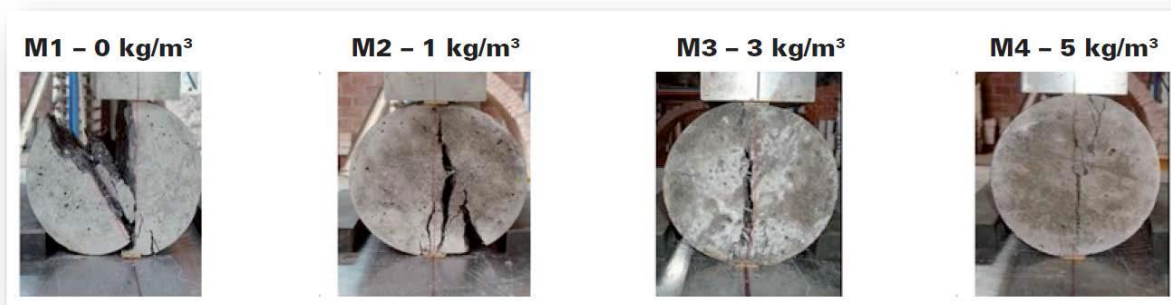


Figura 1. Comportamiento en tensión indirecta de concreto reforzado con fibra

Fuente. (Mendoza, 2010)

En Colombia se han desarrollado pocos estudios enfocados hacia el uso de los CRFA en losas de contrapiso. Sin embargo, se han adelantado algunas investigaciones de concretos reforzado con fibras, las cuales han estado enfocadas en la afectación o modificación de las propiedades mecánicas y físicas. A continuación, se describen los resultados principales de algunas de estos estudios.

En 2004, Meléndez y Nitola evaluaron la influencia de la adición de fibras sintéticas y de acero al concreto, con el fin de comparar las propiedades mecánicas del concreto reforzado. En el programa experimental se realizaron ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a flexión, capacidad de absorción de energía y manejabilidad. La investigación se realizó empleando un concreto con resistencia a compresión de 42 MPa, dos tipos de fibras, y dosificaciones de 10 kg/m<sup>3</sup>, 15 kg/m<sup>3</sup> y 20 kg/m<sup>3</sup> para fibras de acero, y de 0.6 kg/m<sup>3</sup>, 0.8 kg/m<sup>3</sup> y 1.0 kg/m<sup>3</sup> para fibras de sintéticas. A partir de la adición de los diferentes tipos de fibras a la mezcla, en el estudio se evaluaron los resultados del ensayo de asentamiento; la mezcla perdió manejabilidad al adicionarle las fibras. Con respecto al ensayo de resistencia a flexión, se observó que el concreto reforzado con cualquier clase y dosificación de fibra desarrolla una resistencia a flexión mayor que la observada en un concreto convencional. Con la dosificación menor de fibras de acero (10 kg/m<sup>3</sup>) y sintéticas (0.6 kg/m<sup>3</sup>), la resistencia a flexión aumentó 10% con respecto al concreto convencional, mientras que, con fibras sintéticas, el incremento fue de 6.7% a 28 días de edad. El CRFA alcanzó mayores resistencias a flexión, aproximadamente 2% mayores que las resistencias del concreto con fibras sintéticas. Sin embargo, el concreto con fibras sintéticas también superó el valor de la resistencia de la mezcla sin ninguna adición.



En 2004, Herrera y Martínez evaluaron la modificación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto en su estado fresco y endurecido, y su posible aplicación en losas de pavimento rígido. En el estudio se utilizó un concreto con resistencia a compresión de 28 MPa, con adición de 15kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero Dramix, para evaluar las propiedades de manejabilidad, contenido aire, resistencia a compresión, flexión, tensión indirecta, módulo de elasticidad y tenacidad. Al comparar los resultados de las propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero Dramix y del concreto convencional, no se evidenciaron incrementos significativos, con excepción del módulo de tenacidad.

Desde el año 2011, Carillo y Alcocer han estado evaluando concretos reforzados con fibras de acero como una alternativa para reforzamiento a cortante y rehabilitación de muros de concreto de baja altura. Los programas experimentales han incluido el ensayo de muros con refuerzo a cortante en el alma por medio de fibras de acero o muros rehabilitados con encamisados de CRFA, los cuales se sometieron a excitaciones dinámicas reproducidas por mesa vibratoria. Los ensayos se realizaron hasta la falla o daño severo con el fin de cuantificar el desempeño de los muros. En los ensayos se observó que la capacidad de desplazamiento y resistencia de los muros rehabilitados fue similar o superior, respectivamente, que la observada en los muros originales.

## 6 Marco teórico

### 6.1 Concreto

Material estructural que se forma por medio de la mezcla homogénea de los agregados inertes finos o arena, agregados gruesos o grava, un ligante que es cemento hidráulico y agua, con o sin aditivos. (Segura Franco, 2011)

#### 6.1.1 Ensayos de concreto en Estado Fresco

El concreto ostenta unas propiedades físicas que lo clasifican, identifican y caracterizan, la importancia de poderlas cuantificar genera la necesidad de manejar o controlar la confiabilidad y calidad del producto. Por estas razones el énfasis se hace en sus características iniciales analizando asentamiento, contenido de aire y masa unitaria. (Farbianz, 2001)

##### **Asentamiento (NTC-396)**

Según la American Society for Testing and Materials, este ensayo se utiliza para determinar la consistencia del concreto, el ensayo genera una indicación de manejabilidad, plasticidad y capacidad de flujo del concreto. También se utiliza como indicador de uniformidad de concreto en estado fresco.

Según la American Society of Concrete Contractors las variaciones en los resultados de los asentamientos se generan por cambios en el contenido de agua, contenido de aire, aditivos, proporciones y gradación de los agregados, tiempo de despacho y temperatura. (ASCC, 2009)

##### **Contenido de Aire (NTC -1032)**

Este ensayo determina la cantidad de aire que se encuentra en un volumen de concreto, el aire que se encuentra incorporado en una serie de burbujas microscópicas está disperso por toda la mezcla de concreto, que en ocasiones son producidas por la incorporación de aditivos.

Las variaciones de aire en el concreto afectan la durabilidad, la facilidad de manejo, la calidad de los acabados y el rendimiento volumétrico. La cantidad de aire en el concreto se debe a las características de los agregados la dosificación de los mismos y la naturaleza de sus componentes. (ASCC, 2009)

### **Masa Unitaria (NTC-1926)**

El ensayo de masa unitaria busca la determinación de masa por metro cubico de concreto en estado fresco mezclado y genera fórmulas para calcular el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire del concreto.

## **6.2 Concreto reforzado**

Concreto al cual se le ha adicionado un refuerzo de acero en barras, mallas electrosoldadas, pernos con cabeza y fibras de acero deformadas dispersas para absorber los esfuerzos que el concreto por su propia condición no lo puede hacer, pero entendiéndose que el trabajo de los dos materiales es de conjunto, es decir, a partir de la compatibilidad de deformaciones de los dos materiales. (Segura Franco, 2011)

## **6.3 Fibras de acero**

Es un refuerzo que actúa en tres dimensiones reemplazando la malla electro soldada o varilla utilizada en placas de contrapiso y pavimentos que soporten cargas livianas hasta 500 kg/m<sup>2</sup>; replazan el acero de refuerzo en diferentes aplicaciones como pisos industriales, pavimentos, laminas colaborantes, prefabricados, sobre losas, canales y piscinas (Proalco - Bekaert, 2016). El concreto que es reforzado por medio de fibras de acero (CRFA) es un elemento que contiene fibras uniformemente distribuidas y orientadas al azar; las fibras están disponibles en variedad de formas, tamaños y espesores, pudiendo ser redondas, planas, onduladas y son añadidas al concreto durante el proceso de mezcla.

### 6.3.1 Datos técnicos de las fibras de acero

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las fibras Dramix RL-45/50-BN

<i>Morfología</i>	Lisas con ganchos en los extremos
<i>Diámetro</i>	1.05 mm
<i>Longitud</i>	50 mm
<i>Relación longitud -diámetro</i>	45 mm
<i>Cantidad / kg</i>	2800 unid
<i>Esfuerzo a la tensión</i>	1115 MPa
<i>Módulo de elasticidad</i>	21000 MPa

Fuente. Elaboración propia a partir de ficha técnica Dramix

### 6.3.2 Ventajas de las fibras de acero

- Reemplaza la malla electrosoldada y vienen en sacos de papel bio-degradables que se pueden utilizar en los agregados.
- Las fibras se dispersan por todo el concreto, lo que no sucede con las barras de refuerzo o la malla electrosoldada, además no requiere de amarres ni traslajos.
- El concreto reforzado con fibras es más resistente a los daños accidentales, por ejemplo, en cuanto a anti-desprendimiento se requiere.
- Una de las principales ventajas de las fibras respecto a las barras de acero es el tamaño.
- No requiere de personal calificado en las áreas de almacenamiento, corte o soldadura; únicamente para las dosificaciones de la fibra.

Específicamente en cuanto a las fibras de acero Dramix RL-45/50-BN se tiene que:

- Los extremos de las fibras de acero están conformados, esto permite un buen anclaje y una fisuración controlada.

- Las fibras se fabrican con alambre de acero trefilado en frío de alta calidad, para garantizar gran resistencia a la tracción.
- Están encoladas en peines, lo que permite que las fibras largas y finas se mezclen de forma fácil y uniforme en el concreto.
- Debido a la alta relación longitud/diámetro de las fibras, ofrece el efecto de red de fibras más homogéneo en el concreto, dando como resultado óptimo control de fisuras.

### **6.3.3 Trabajo a temprana edad**

En edades tempranas del concreto, se producen planos de debilitamiento y fisuración por contracción plástica; esto se debe a las tensiones producidas por el asentamiento y pérdida de humedad del concreto; las fibras previenen la fisuración mediante un bloqueo mecánico a la mezcla, su sistema de soporte interno impide la formación de las grietas gracias a su distribución a través de toda la pasta de cemento, evitando así la aparición de fisuras por contracción plástica, disminuyendo la permeabilidad y la capilaridad por la exudación.

### **6.3.4 Trabajo de las fibras de acero en concreto endurecido**

Cuando el concreto simple es sometido a esfuerzos de compresión, se fractura y falla con la aparición de la primera grieta, las fibras de acero impiden el efecto ocasionado por las fuerzas de rotura. Los principales efectos que trae consigo el uso de fibras de acero en los concretos son:

- Mejora del comportamiento a flexotracción.
- Incremento de la resistencia a rotura.
- Reducción de la deformación bajo cargas mantenidas.
- Aumento de la resistencia a tracción.
- Fuerte incremento en la resistencia a impacto y choque.
- Fisuración controlada y aumento de la durabilidad.

### **6.3.5 Interacción fibras de acero-concreto**

La interacción de los materiales es un factor muy importante para las propiedades físicas del concreto, la adición de las fibras no genera cambio alguno en las características químicas del concreto.

### **6.3.6 Comportamiento mecánico concreto reforzado con fibras de acero**

La combinación de las fibras en el cemento endurecido permite un aumento de la fuerza máxima y genera un pico de tenacidad mayor. El modo en que se reparten las fibras, su proximidad o cercanía, su ubicación tridimensional es lo que asegura que el proceso de agrietamiento sea controlado. Como ya se ha indicado anteriormente la eficacia de las fibras es su conexión directa a la matriz de concreto y el potencial para transmitir carga debido al número presente de fibras y su respectiva orientación.

Las fibras entran en juego con la pasta de cemento con el fin de absorber energía y controlar el crecimiento de las fisuras, la transferencia de carga a través fibras genera un efecto denominado puente o puenteo, es decir el paso de la tensión de una cara de la grieta a la otra a través de la fibra y finalmente el suceso de separación de la fibra y el concreto.

El efecto de puenteo funciona correctamente por la asignación aleatoria de las fibras a través fisura, de modo que muchas de las fibras que se cruzan en la falla están horizontales, verticales e inclinadas en un plano x,y,z. la longitud de la fibra es determinante, se creería que entre mayor sea longitud más carga soportaría o energía absorberá, pero ocurre totalmente lo contrario debido a que una fibra de mayor longitud puede a travesar varios puntos críticos los cuales le generaran varios puntos de tensión, al contrario una fibra de menor longitud abraza una fisura y transmite la carga directamente a otra fibra o a la matriz.

## 7 Metodología

### 7.1 Tipo de investigación

El proyecto es experimental, este estudio se basa en ensayos realizados en probetas o elementos de concreto cilindro, vigas (estándar según NTC-550) y losas (estándar según NTC-5721). Después de realizados los ensayos y obtenido los resultados, se realiza un análisis comparativo de sus propiedades mecánicas.

#### **Delimitación Espacial**

La investigación se realizó en la ciudad de Bogotá, en los laboratorios de la Universidad Militar Nueva Granada. El concreto fue suministrado por la empresa ARGOS S.A. y las fibras de acero Dramix por PROALCO BEKAERT al departamento de estructuras y sísmica de la Universidad Militar Nueva Granada.

#### **Dosificaciones**

Se utilizaron tres diferentes dosificaciones para el refuerzo de las probetas, utilizando las siguientes dosificaciones: 5 kg/m<sup>3</sup>, 9 kg/m<sup>3</sup> y 18 kg/m<sup>3</sup>.

### 7.2 Etapas de la investigación

**Etapas I. Recopilación de Información.** Consiste en la investigación bibliográfica previa al presente estudio, con el fin de obtener todos los antecedentes relacionados al tema de estudio.

**Etapas II. Elaboración y Curado de los Especímenes de Concreto.** Luego de determinar las dosificaciones de los materiales, se procede a la elaboración de cilindros de concreto (medidas estándar 0,15 m x 0,30 m), vigas (medidas estándar 0,15 m x 0,15 m x 0,60 m) y losas de (medidas estándar 0,60 m x 0,60 m x 0,10 m).

**Etapa III. Ensayos al concreto.** Consiste en la ejecución de los siguientes ensayos al concreto fresco y endurecido, de acuerdo a la tabla 2.

- Asentamiento (NTC – 396)
- Masa unitaria (NTC – 1926)
- Contenido de aire (NTC – 1032)
- Resistencia a la compresión (NTC - 550)
- Tensión indirecta (NTC - 722)
- Esfuerzo a la Flexión (NTC - 2871)
- Absorción de energía (NTC - 5721)

Tabla 2. Especímenes de concreto fundidos

Ensayo	Tipo de muestra	Concreto Simple		Concreto Reforzado con fibras de acero (dosificaciones)			Total
		Muestra concreto simple	Muestra con Malla electro-soldada	5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>	
Resistencia a la compresión	Cilindro	2	N/A	2	2	4	10
Resistencia a la tensión indirecta (compresión diametral)	Cilindro	4	N/A	3	3	3	13
Resistencia a la flexión	Viga	3	N/A	3	2	3	11
Absorción de energía (flexión en losas)	Losa	1	2	2	2	2	9

Fuente. Elaboración propia



**Etapa IV. Comparación de datos obtenidos y conclusiones.** Una vez ejecutados los ensayos experimentales, se procede al análisis a partir de la información recolectada y se complementa por medio de las siguientes actividades:

- Curva de Carga - Deformación del concreto.
- Graficas de las propiedades físicas del concreto en estado Fresco.
- Graficas de resistencia a la compresión, tensión indirecta, flexión y absorción de energía.

**ETAPA VI. Conclusiones finales.**

## 8 Etapa experimental

### 8.1 Curado inicial

Citando la NTC 550, “*Los especímenes se almacenaron un intervalo de temperatura de 16 °C a 27 °C y en un ambiente húmedo, de manera que se impida la pérdida de humedad hasta por 48 Horas. En todo momento protegidos de la luz solar directa y de dispositivos de calefacción radiantes. Los especímenes deben ser transportados antes de 48 horas al laboratorio para el curado final, deben permanecer en los moldes en un ambiente húmedo, hasta que sean recibidos en el laboratorio, desmoldados y sometidos a curado final. (NTC-550, P.9)*”



Figura 2. Moldes para elaboración de especímenes



Figura 3. Toma de asentamiento



Figura 4. Toma de masa unitaria



Figura 5. Vigas y losas fundidas



Figura 6. Cilindros fundidos

## 8.2 Curado final

Citando la norma NTC -550, “Al terminar el curado inicial y antes de que transcurran 30 min después de retirado el molde, se deben almacenar los especímenes en un ambiente húmedo, con agua libre sobre la superficie de estos, a una temperatura de 23 °C y 30 °C. (NTC-550, P.10)”



Figura 7. Curado de Cilindros



Figura 8. Curado de Vigas



Figura 9. Curado de Losas

### 8.3 Preparación de muestras para ensayos

Al cabo de 28 días transcurridos desde el vaciado de los especímenes, se inicia la preparación de los ensayos a realizar.

### 8.4 Resistencia a la compresión (NTC-673)

De acuerdo con el procedimiento indicado en la norma, se tomaron los siguientes datos de cada uno de los cilindros a ensayar:

- Peso de cada uno de los cilindros.
- 3 diámetros por cada superficie.
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (largo)



Figura 10. Cilindros a fallar



Figura 11. Cilindro para compresión

### 8.5 Tensión indirecta (NTC-722)

Para realizar el ensayo de tensión indirecta, se requiere la siguiente preparación para cada una de las muestras:

- Peso de cada una de los cilindros.
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (largo)
- 3 diámetros por cada superficie.
- 2 perforaciones de 0,03 m de profundidad distanciados 5 cm en el centro del diámetro, de cada cara.
- Pegar con un epóxico, un esparrago de 0,00794 m de diámetro y 0,08 m de longitud en cada perforación del punto anterior.



Figura 12. Cilindro perforado



Figura 13. Peso de cilindro perforado

## 8.6 Resistencia a la flexión (NTC-2871)

De acuerdo con el procedimiento indicado en la norma, se prepararon las muestras y se tomaron los siguientes datos de las vigas a ensayar:

- Peso de cada una de las vigas.
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (largo)
- 3 tomas de longitud por cada espécimen (ancho)
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (alto)
- 1 perforación de 0,03 m de profundidad a 0,075 m del borde inferior, en total 2 perforaciones por cada cara espaciadas 0,45 m, 4 en total.
- Fijar con epóxico, un esparrago de 0,00794 m de diámetro y 0,08 m de longitud en cada perforación del punto anterior.



Figura 14. Peso de la viga perforada



Figura 15. Viga para ser ensayada



### 8.7 Absorción de energía, tenacidad del concreto (NTC- 5721)

Para realizar el ensayo de absorción de energía de acuerdo al procedimiento descrito en la norma, se prepararon las muestras y se tomaron los siguientes datos de las losas a ensayar:

- Peso de cada una de las losas.
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (largo)
- 3 tomas de longitud por cada espécimen (ancho)
- 2 tomas de longitud por cada espécimen (alto)
- Pintar de blanco con una solución de cal y agua.
- Realizar 1 perforación de 0,03 m de profundidad a 0,03 m del borde en L/2, en total 4 perforaciones en la cara superior.
- Fijar con epóxico, un esparrago de 0,00794 m de diámetro y 0,08 m de longitud en cada perforación del punto anterior.
- Realizar una cuadrícula espaciada cada 0,15 cm en las dos caras principales.



Figura 16. Perforaciones en losa



Figura 17. Losa preparada para ser ensayada

## 9 Propiedades físicas

### 9.1 Características iniciales del concreto

En la siguiente tabla se observa la composición de la mezcla, que fue diseñada por Argos S.A para alcanzar una resistencia de 21 MPa.

Tabla 3. Mezcla para concreto de 21 MPa

Descripción	Diseño (Kg)	Requerido (Kg)	Lote (Kg)	% VAR	% Humedad	% Diseño	% Requerido
Cemento RIO C1	298	745	744	-0.13	0.8%M	12.17	12.3778
Grava SAL 1"	989	2391	2395	0.15	5.49%A	40.40	39.7254
Arena de Rio	790	2083	2995	0.56	4.51%A	32.27	34.6081
Arena de Peña	198	517	520	0.51		8.09	8.5897
Agua	170	275	277	0.61		6.94	4.5690
SIKA PLAST D7	1.79	4.47	4.48	0.22		0.073	0.0743
SIKA Viscoflow 70C	1.341	3.353	3.36	0.22		0.055	0.0557

Fuente. Elaboración propia a partir de datos suministrados por Argos S.A.

### 9.2 Asentamiento (NTC-396)

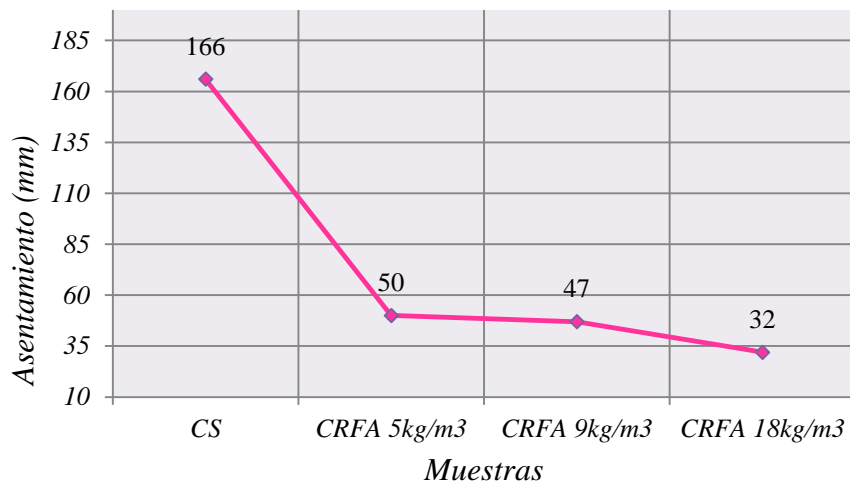
Se coloca una muestra de concreto fresco en un molde tronco cónico y se compacta mediante una varilla. El molde se levanta permitiendo que el concreto se asiente. El asentamiento corresponde a la diferencia entre la posición inicial y la desplazada de la superficie superior del concreto. Las mediciones se deben tomar en el centro de la cara superior.

Tabla 4. Asentamiento CS y CRFA

	Concreto simple	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento (mm)	166	50	47	32

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 1. Asentamiento CS y CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Se observa que el asentamiento disminuye con el aumento de la dosificación de fibras de acero, esto debido a que las fibras producen un efecto de enganche, que disminuye el asentamiento natural del concreto.

### 9.3 Masa unitaria (NTC-1926)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación de la masa por metro cubico de concreto fresco y mezclado; después de verter el concreto en moldes cuyo volumen sea menor de 11L, el concreto se compacta por apisonado y luego se enrasa la superficie superior y se afina por medio de una lámina; posteriormente se retira el exceso de concreto del exterior del molde y se determina su masa neta.

La masa unitaria  $M$ , se calcula dividiendo la masa neta de con concreto entre el volumen del molde usado.



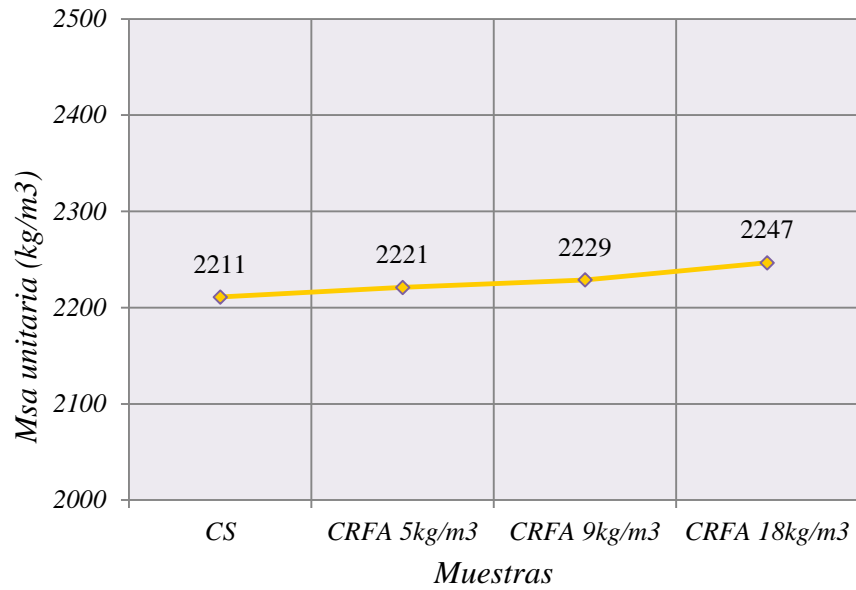
Figura 18. Masa unitaria, determinación de masa neta del concreto

Tabla 5. Masa unitaria concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero

	Concreto simple	Concreto reforzado con fibras de acero		
		Dosificación		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>
Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	2211.00	2220.90	2228.82	2246.64

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 2. Masa unitaria CS y CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Los valores de masa unitaria obtenidas se encuentran dentro de los rangos establecidos en la NSR-10 para concreto simple de peso normal (2155 kg/m<sup>3</sup> a 2555 kg/m<sup>3</sup>).

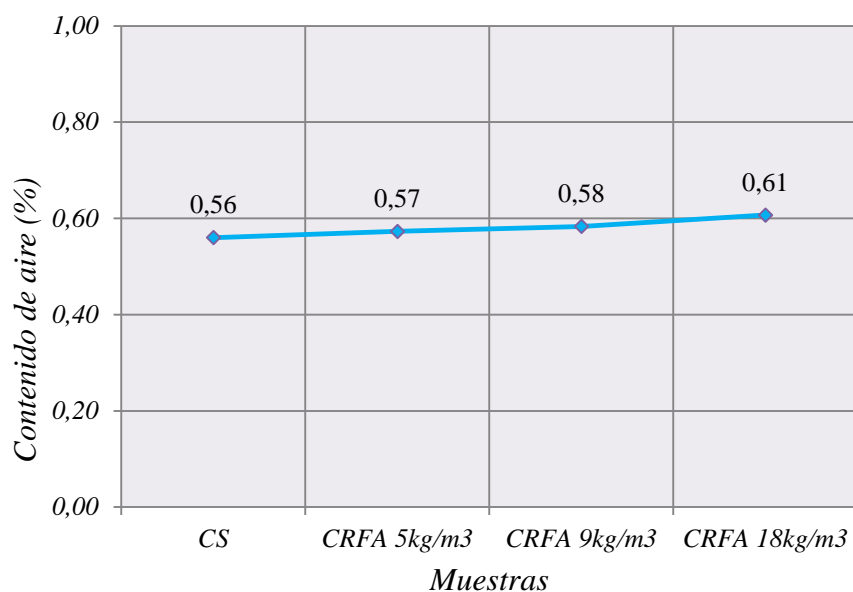
#### 9.4 Contenido de aire (NTC-1032)

Tabla 6. Contenido de aire en concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero

	Concreto reforzado con fibras de acero			
	Concreto simple	Dosificación		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de aire (%)	0.56	0.57	0.58	0.61

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 3. Contenido de aire CS y CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

No se registran cambios significativos del contenido de aire entre las diferentes muestras.

## 10 Propiedades mecánicas

### 10.1 Resistencia a la compresión (NTC-673)

El ensayo de resistencia a la compresión se toma a los 28 días de edad, utilizando cilindros de concreto con una relación de altura-diámetro 2:1; los cilindros se fallan verticalmente y alcanzan su máxima resistencia aproximadamente entre 2 y 3 minutos. El cilindro estándar presenta dimensiones que oscilan entre 0.30 – 0.305 m de Altura y 0.150 – 0.152 m. (Park & Paulay, 1978)

La prueba consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a los cilindros o núcleos a una velocidad que está dentro de un intervalo establecido de 0,14 MPa/s a 0,34 MPa/s, la velocidad se calcula según las dimensiones del cilindro tomando un promedio de 3 alturas y 2 diámetros; finalmente la resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga máxima alcanzada entre el área de la sección transversal del espécimen. (NTC-673, 2000)

La clasificación del tipo de falla se puede realizar de acuerdo a la siguiente figura:

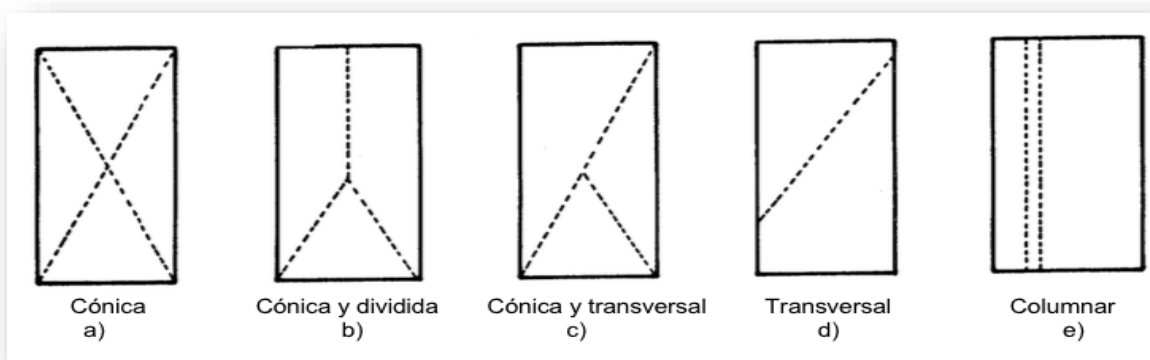


Figura 19. Tipos de falla. Tomado NTC – 673, p 11.

- Cónica (a), se presenta cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado.
- Cónica y dividida (b), se presenta en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y deficiencias del material de refrentado o rugosidades en el plano de refrentado.
- Transversal (c), se presenta cuando las caras de aplicación de carga del espécimen están ligeramente fuera de las tolerancias (especificada de 0.5) de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen con respecto al eje de carga de la máquina.
- Cónica-Transversal (c), se presenta cuando las caras de aplicación de carga del espécimen están ligeramente fuera de las tolerancias (especificada de  $0.5^\circ$ ) de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen con respecto al eje de carga de la máquina.
- Transversal (d), se presenta comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de desviación (perpendicularidad) tolerada específica de  $0.5^\circ$ .
- Columnar (e), se presenta en especímenes que poseen una cara de aplicación de carga cóncava y por deficiencias del material de refrentado, también puede darse por concavidad de una de las placas de carga.

A continuación, se presenta la siguiente tabla que resume los valores de carga máxima (N), resistencia (MPa) y el tipo de falla que presento cada una de las probetas:



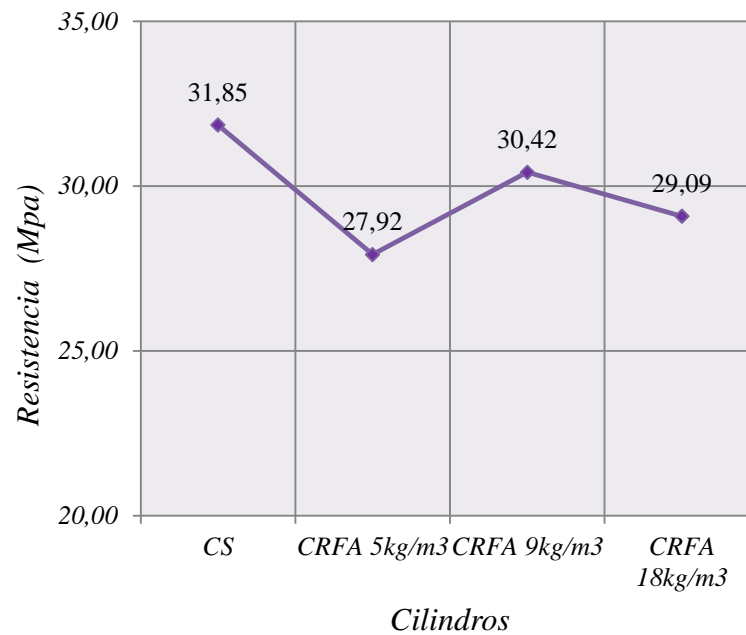
Tabla 7. Resistencia a la compresión

ID cilindro	Edad (días)	Carga máxima (N)	Resistencia (MPa)	Tipo de rotura
CS-1	35	565318	31.99	b
CS-2	35	560351	31.71	a
CRFA1D5	35	483473	27.36	b
CRFA2D5	35	503344	28.48	a
CRFA1D9	35	534611	30.25	d
CRFA2D9	35	540477	30.58	a
CRFA1D18	35	524861	29.70	b
CRFA2D18	35	461263	26.10	a
CRFA3D18	176	483997	27.39	a
CRFA4D18	176	585802	33.15	b

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Todos los cilindros fallados generaron fallas tipo (a, b y d).

Gráfico 4. Resistencia a la compresión CS y CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales



Figura 20. Cilindros para ensayo a compresión



Figura 21. Ensayo a compresión



Figura 22. Cilindro Fallado

## 10.2 Resistencia a la tensión indirecta (NTC-722)

Consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en la longitud de un espécimen de concreto cilíndrico a una velocidad que se encuentra dentro del intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. Esta carga induce esfuerzos de tensión en el plano que contiene la carga aplicada y esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente circundante a la carga aplicada. Ocurre falla por tensión, no por compresión, ya que las áreas de aplicación de carga se encuentran en estado de compresión triaxial, lo que les permite soportar esfuerzos de compresión mayores que los indicados en el resultado del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial. (NTC722, 2000, pág. 2)

De acuerdo con la norma NTC 722, la resistencia a la tensión indirecta de los especímenes objeto de ensayo, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * l * d}$$

Donde,

$T$  = Resistencia a la tensión indirecta (MPa)

$P$  = Carga máxima aplicada (N)

$l$  = Longitud (m)

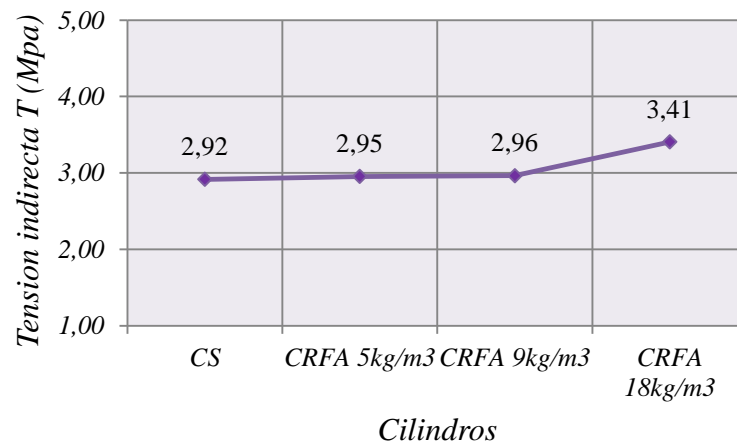
$d$  = Diámetro (m)

Tabla 8. Cálculo de tensión indirecta

ID cilindro	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Edad (días)	Carga máxima (N)	Tensión indirecta (MPa)
CS1	305	150	117	216277	3.01
CS2	308	158	117	222771	2.91
CSFT2	300	156	118	217298	2.96
CSFT3	304	155	118	206037	2.78
CF5FT1	302	156	117	209967	2.84
CF5FT2	301	154	118	226237	3.11
CF5FT3	300	152	119	208726	2.91
CF9FT1	300	150	117	215192	3.04
CF9FT2	310	157	118	219630	2.87
CF9FT3	300	155	119	217393	2.98
CF18FT1	293	155	117	257306	3.61
CF18FT2	331	159	118	278660	3.37
CF18FT3	315	152	119	243653	3.24

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 5. Resistencia promedio a la tensión indirecta



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales



Figura 23. T.I, Montaje de marco

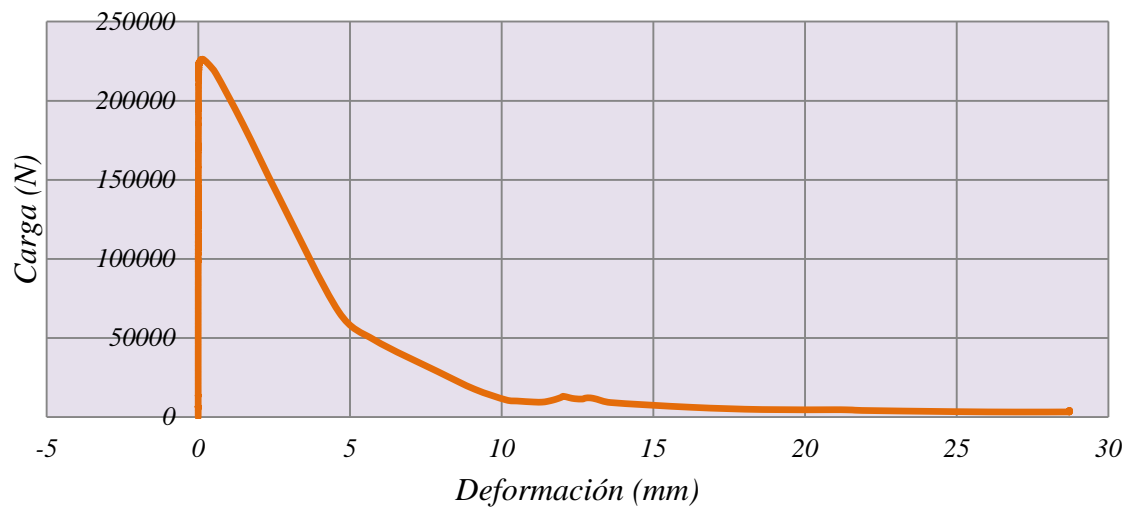


Figura 24. T.I, Cilindro Fallado

### Resistencia a tensión indirecta: Carga – Deformación

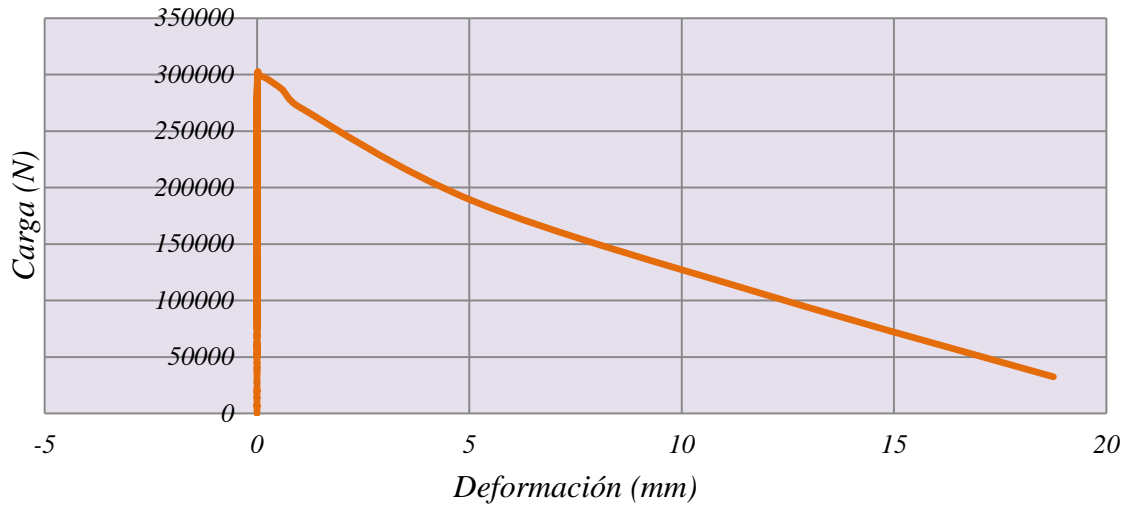
Especímenes de CS

Gráfico 6. Tensión indirecta CS-1



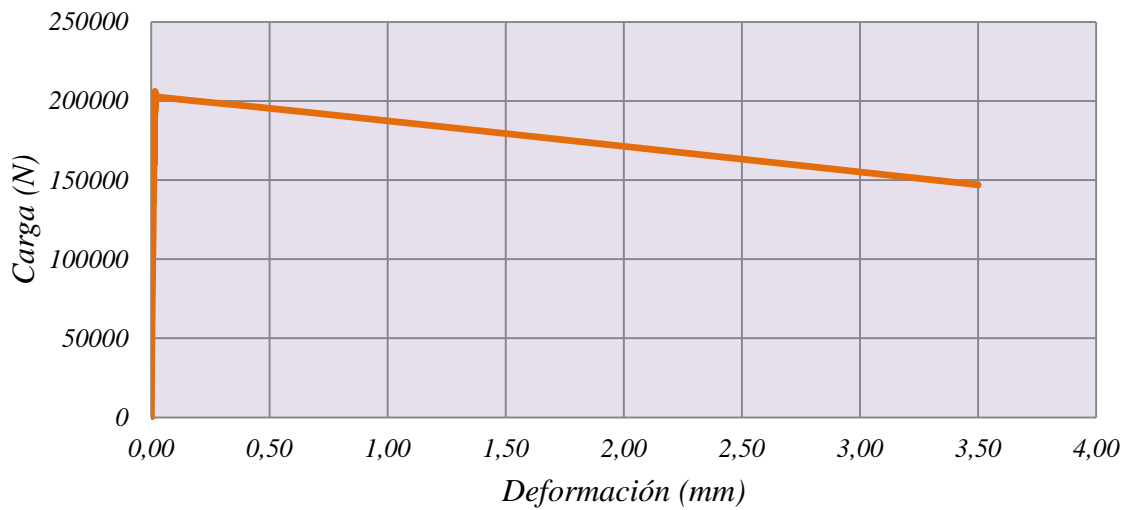
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 7. Tensión indirecta CS-2



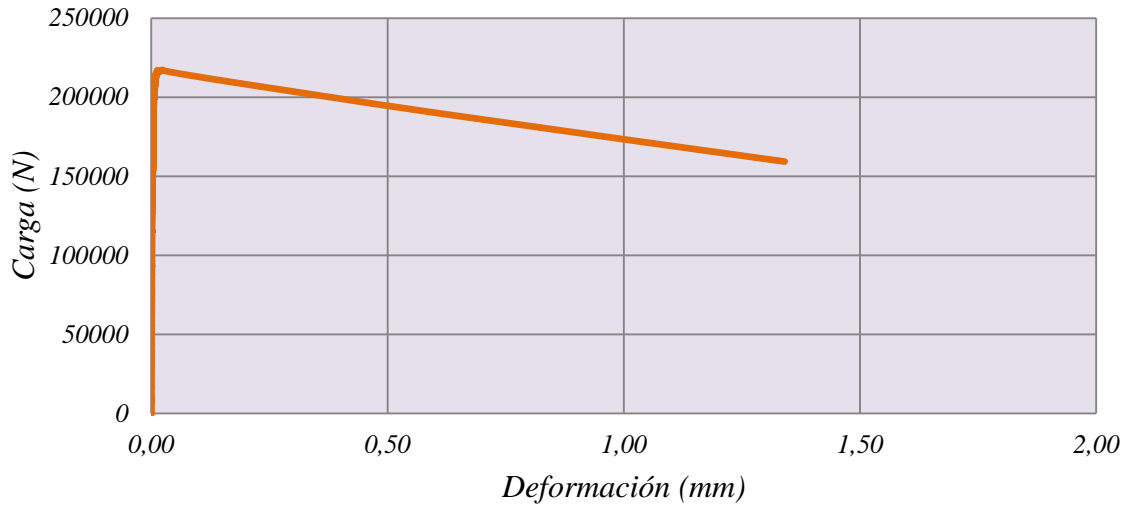
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 8. Tensión indirecta CSFT2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

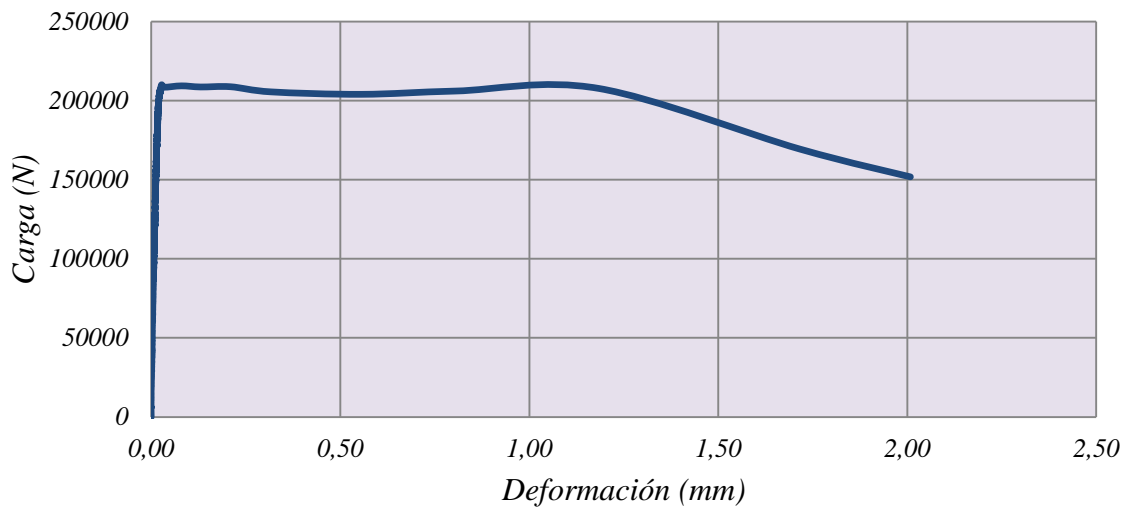
Gráfico 9. Tensión indirecta CSFT3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

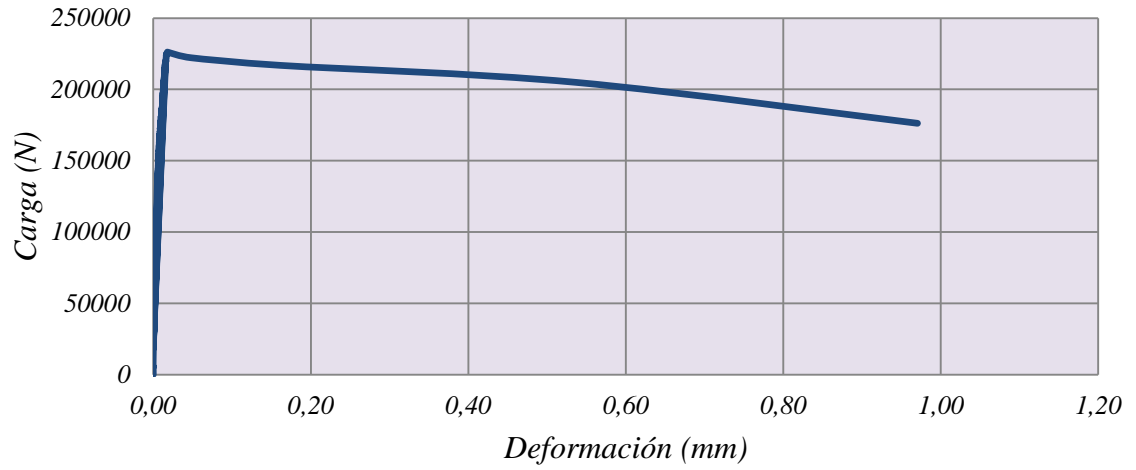
Especímenes de CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 10. Tensión indirecta CF5FT1



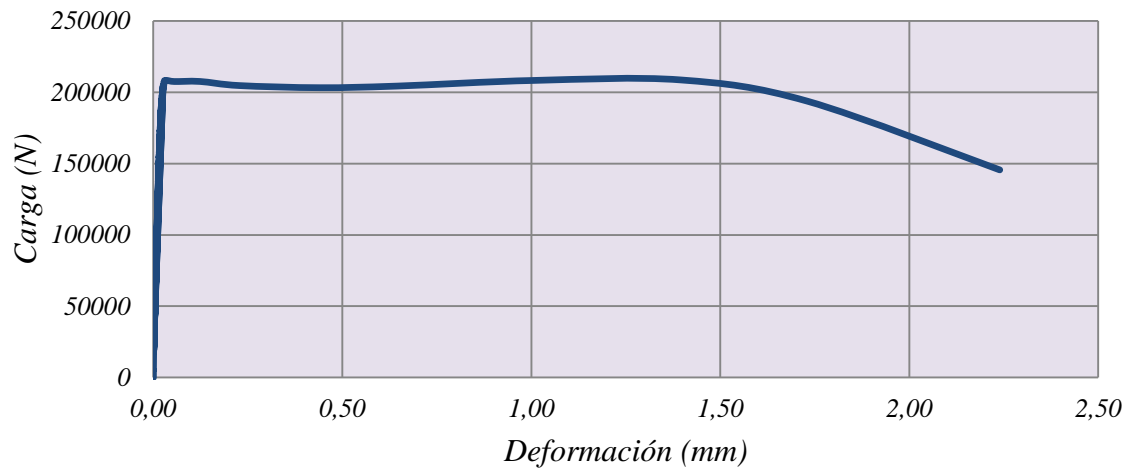
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 11. Tensión indirecta CF5FT2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 12. Tensión indirecta CF5FT3

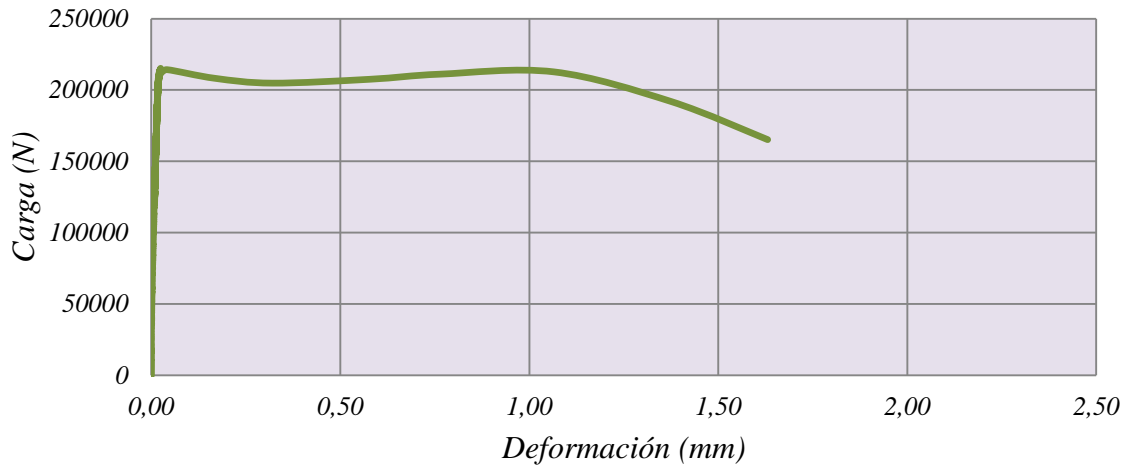


Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales



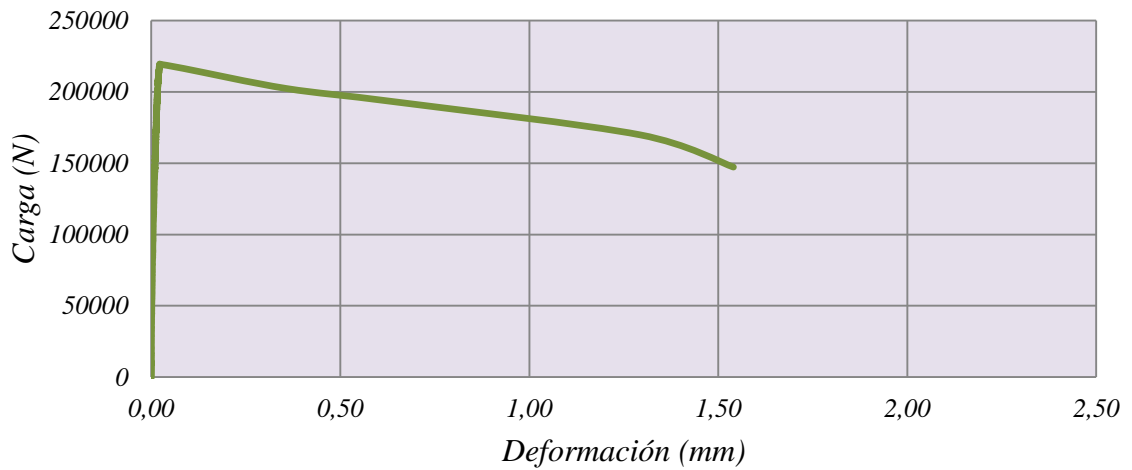
Especímenes de CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 13. Tensión indirecta CF9FT1



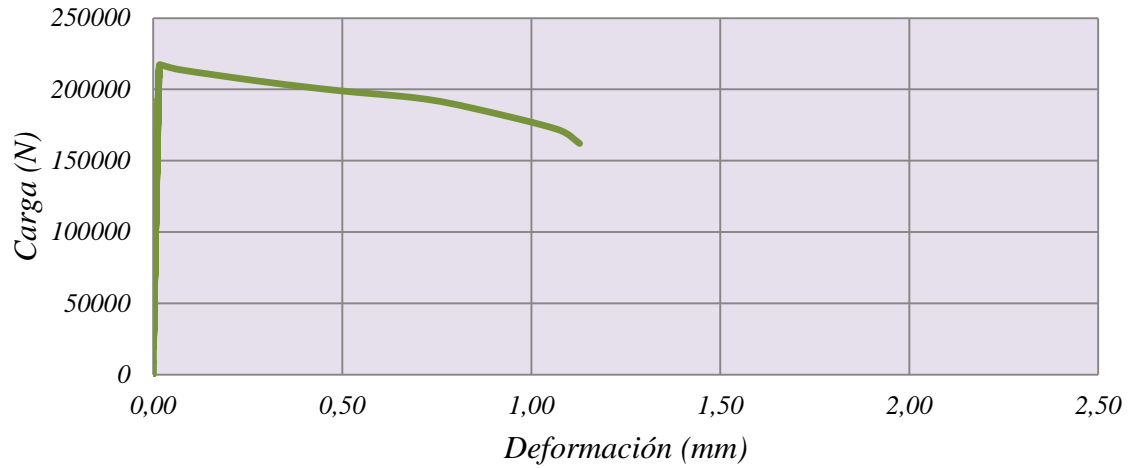
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 14. Tensión indirecta CF9FT2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

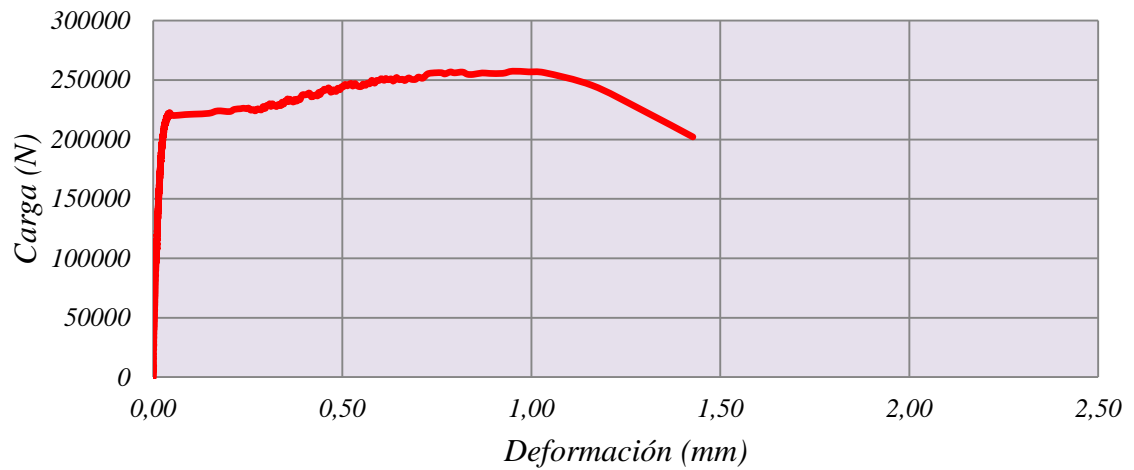
Gráfico 15. Tensión indirecta CF9FT3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

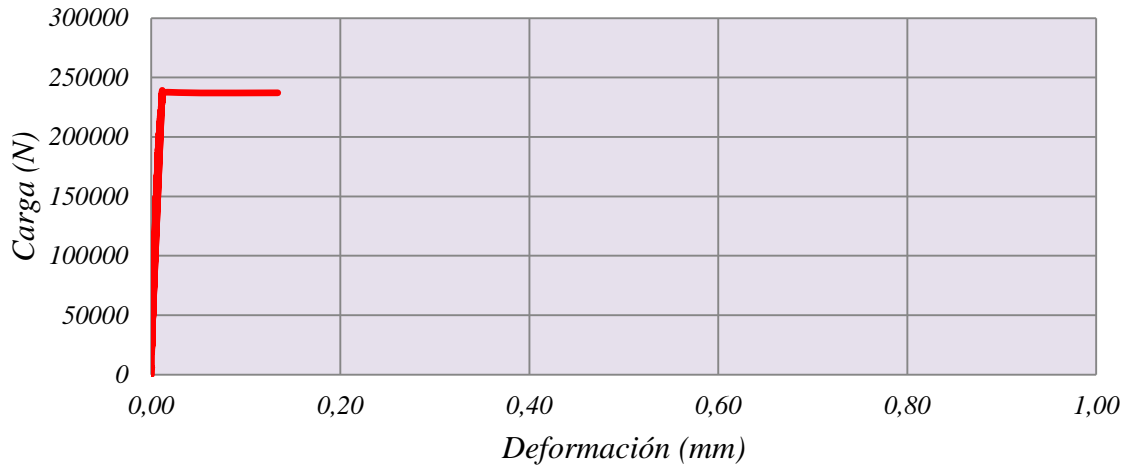
Especímenes de CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 16. Tensión indirecta CF18FT1



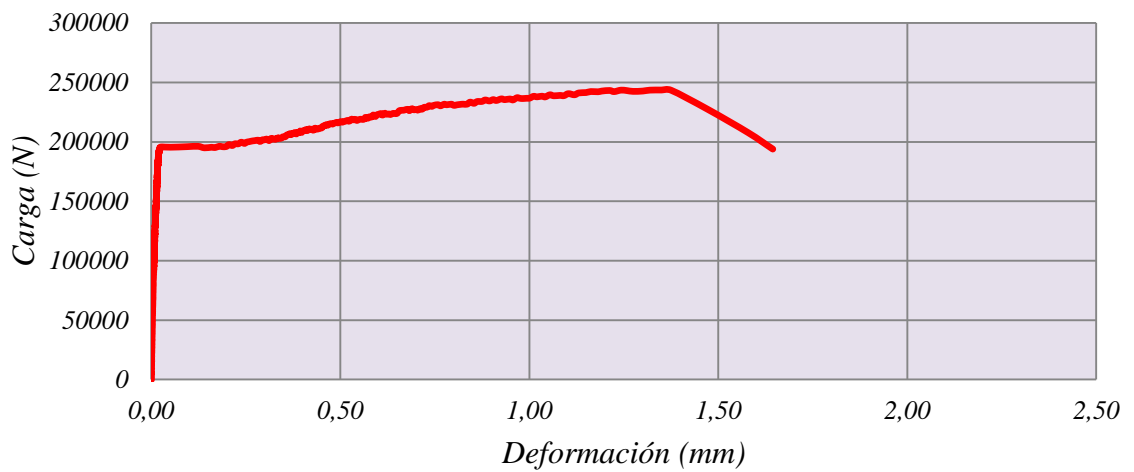
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 17. Tensión indirecta CF18FT2



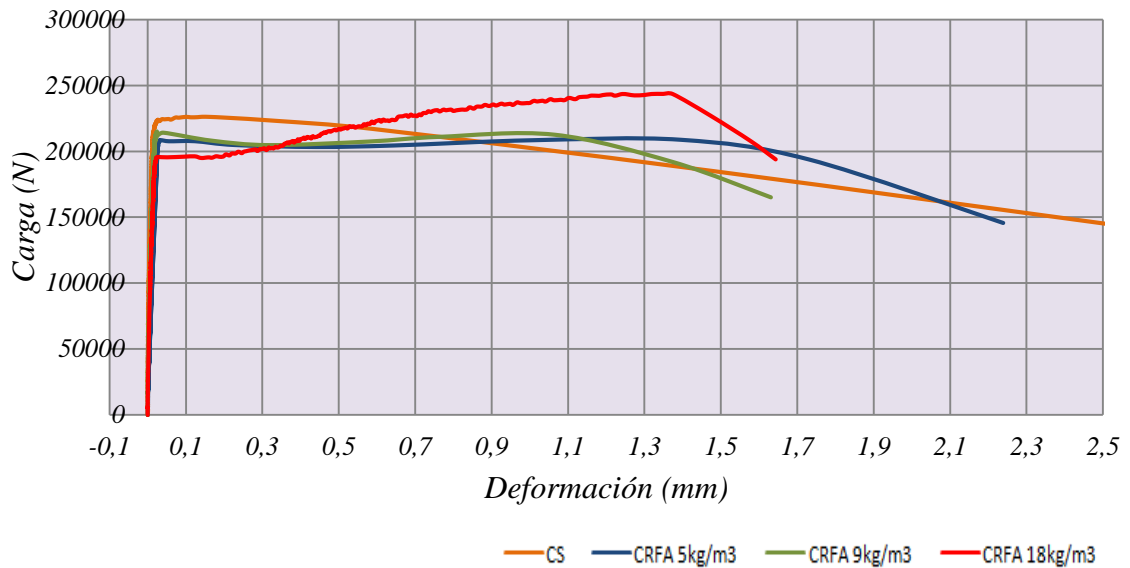
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 18. Tensión indirecta CF18FT3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 19. Tensión indirecta, CS vs CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

### 10.3 Resistencia a la flexión (NTC-2871)

Las vigas son elementos que se disponen horizontalmente dentro de una estructura y están destinadas a soportar cargas, se encuentran sometidas a esfuerzos de flexión, por lo tanto, los materiales con los que se construyen tienen que soportar esfuerzos de tracción y de compresión al mismo tiempo. Debido a que ningún material es totalmente rígido, las vigas tienden a curvar, dando como resultado que la parte superior se comprime y parte inferior se tracciona.

Las vigas son elementos que transmiten cargas externas transversales que provocan momentos flexionantes y esfuerzos cortantes en su longitud (Park & Paulay, 1978), puesto que se conciben no solo para soportar presión y peso, sino también flexión y tensión.

En principio, es importante definir que en la teoría de vigas se contempla aquello que es denominado “resistencia de los materiales”. Así, es posible calcular la resistencia del material con que está hecha, y además analizar la tensión, sus desplazamientos y el esfuerzo que puede soportar. (Que es una viga, 2012)

Por medio del ensayo de resistencia del concreto a la flexión, se establece el esfuerzo a la flexión mediante el uso de una viga simple con carga en los tercios medios; es utilizado para determinar el cumplimiento de las proporciones de dosificación, mezcla y colocación del concreto, especialmente en ensayos de concreto destinados para la construcción de losas y pavimentos; los resultados se calculan y reportan como módulo de rotura (MPa); existen dos formas de calcular dicho modulo (R) dependiendo de la zona donde se presente la fractura durante la ejecución del ensayo:

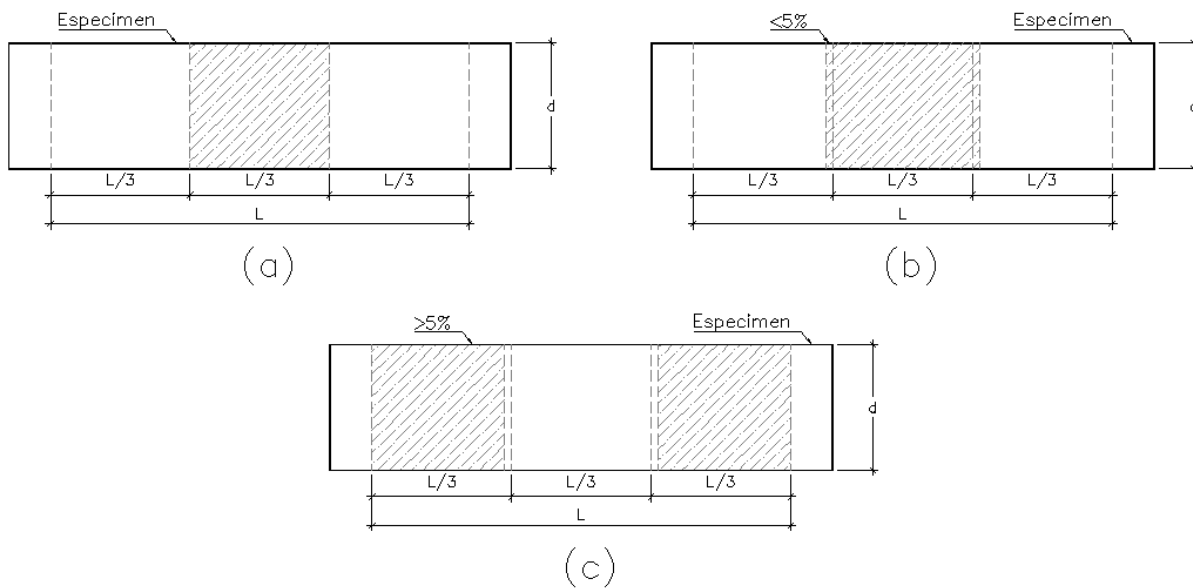


Figura 25. Zonas de fractura del espécimen

Fuente. Elaboración propia

- a) La fractura se inicia en la superficie sometida a tensión dentro del tercio medio de la distancia entre apoyos:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

$R =$  *Modulo de rotura (MPa)*

$P =$  *Carga máxima aplicada (N)*

$L =$  *Distancia entre apoyos (mm)*

$b =$  *ancho promedio de la probeta en la fractura (mm)*

$d =$  *altura promedio de la probeta en la fractura (mm)*

- b) La fractura se inicia en la superficie sometida a tensión fuera del tercio medio de la distancia entre apoyos en nomas de un 5%:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

$a =$  *Distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de la viga (mm)*

- c) La fractura ocurre en la superficie sometida a tensión por fuera del tercio medio de la distancia entre apoyos, en más de un 5 % de ésta, no se tiene en cuenta el ensayo.

### **Absorción de energía (Tenacidad)**

La tenacidad se define como la capacidad que tiene un elemento de absorber energía en el campo plástico antes de fracturarse; se determina como el área bajo la curva esfuerzo-deformación, y es una indicación del trabajo total por unidad de volumen que puede realizarse sobre el material sin que se produzca rotura. La tenacidad se reporta como el valor de la energía en Julios (J).

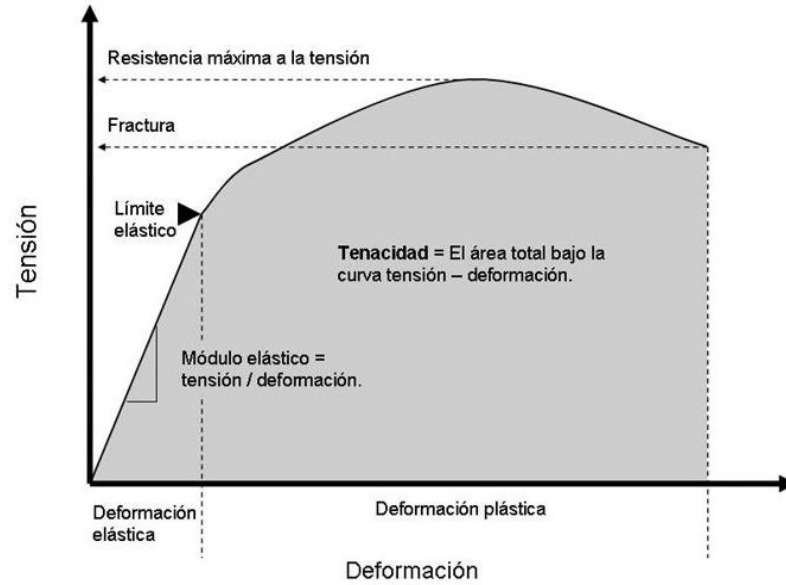


Figura 26. Tenacidad, curva esfuerzo-deformación

Fuente. <http://slideplayer.es/slide/1024831/>

Tabla 9. Resistencia del concreto a flexión, datos previos a la prueba

ID viga	Edad	Dimensiones de la Probeta (mm)			Peso (Kg)
	(días)	b	d	Long	
CS-V-1	105				31.00
CS-V-2	106				32.10
CS-V-3	106				31.45
CRFAD5-V1	174				33.81
CRFAD5-V2	174				33.95
CRFAD5-V3	174	150	150	600	33.24
CRFAD9-V1	174				33.86
CRFAD9-V2	174				34.00
CRFAD18-V1	174				33.50
CRFAD18-V2	174				33.00
CRFAD18-V3	174				33.43

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales



Figura 27. Esfuerzo a la flexión, L/3 en vigas CRFAD5-V1 CRFAD9-V2



Figura 28. Esfuerzo a la flexión, viga sobre marco de carga





Figura 29. Esfuerzo a la flexión, fractura de viga

Tabla 10. Resistencia del concreto a flexión, Modulo de rotura

ID viga	L	Carga máxima (N)	Zona de fractura del espécimen	Dimensiones del espécimen en el lugar de la fractura (mm)		Módulo de Rotura (MPa)
	(mm)			b	d	
CS-V-1	450	31304	a	150	154	3.96
CS-V-2	448	27089	a	155	151	3.43
CS-V-3	446	31455	a	150	157	3.79
CRFAD5-V1	451	33011	a	153	152	4.21
CRFAD5-V2	450	30161	a	154	154	3.72
CRFAD5-V3	452	35545	a	154	153	4.46
CRFAD9-V1	449	31476	a	155	151	4.00
CRFAD9-V2	449	32373	a	152	154	4.03
CRFAD18-V1	450	36303	a	155	153	4.50
CRFAD18-V2	451	30298	a	153	152	3.87
CRFAD18-V3	453	30549	a	152	154	3.84

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

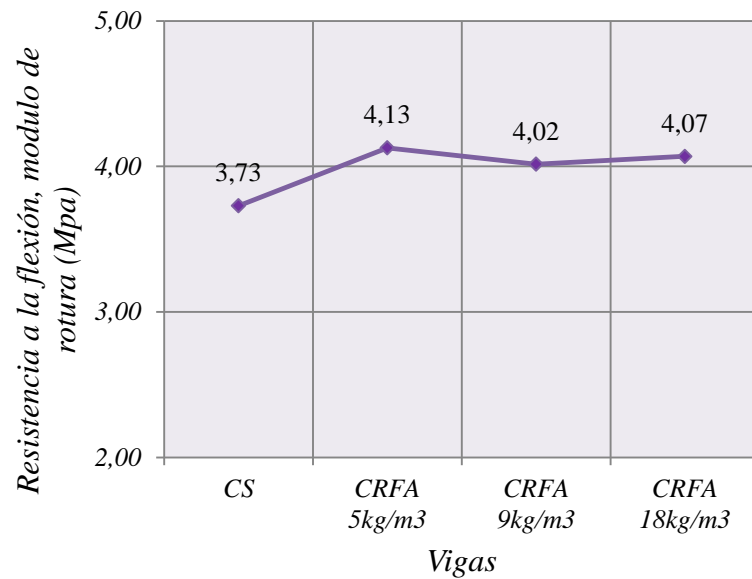


Figura 30. Esfuerzo a la flexión, espécimen CS-V-2 fallado



Figura 31. Esfuerzo a la flexión, especímenes CRFAD9-V1 y CRFAD18-V2  
fallados

Gráfico 20. Esfuerzo a la flexión, módulo de rotura

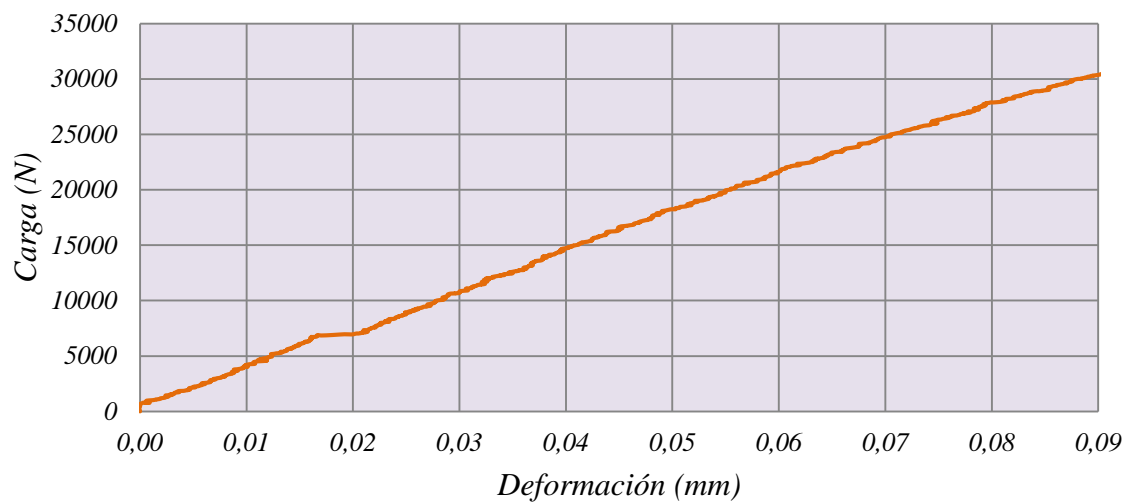


Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

### Absorción de energía (Tenacidad)

Especímenes de CS

Gráfico 21. Esfuerzo a la flexión CS-V1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(4 \times 10^{11})x^6 + 1 \times 10^{11}x^5 - 1 \times 10^{10}x^4 + 7 \times 10^8x^3 - 2 \times 10^7x^2 + 479333x + 317.93$$

$$\text{Limite Superior} = 0.09730 \quad \text{Límite Inferior} = -0.00010$$

Área bajo la curva:

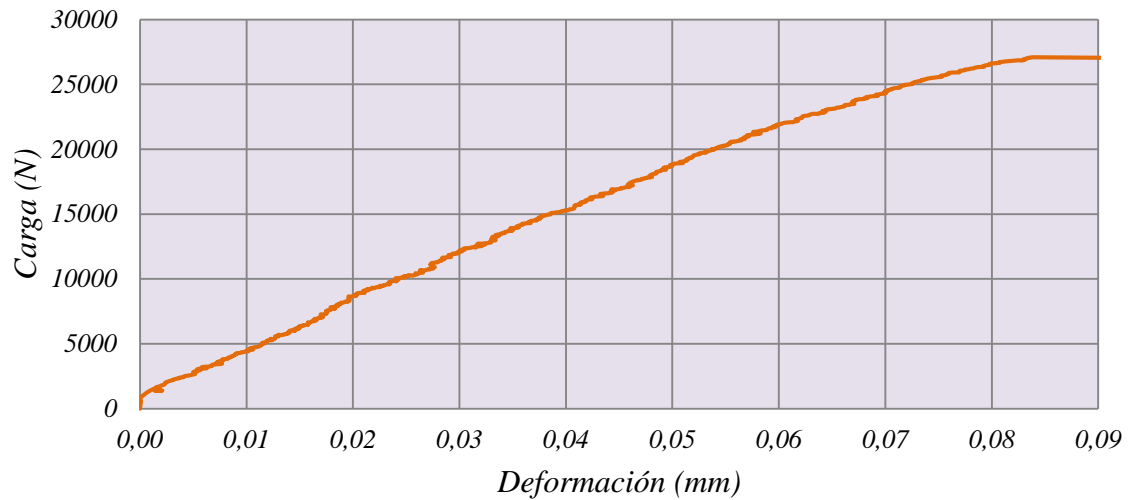
$$A = \int_{-0.00010}^{0.09730} -(4 \times 10^{11})x^6 + 1 \times 10^{11}x^5 - 1 \times 10^{10}x^4 + 7 \times 10^8x^3 - 2 \times 10^7x^2 + 479333x + 317.93 \, dx$$

$$A = 3826.65$$

El área bajo la curva del gráfico (21) determina la capacidad de absorción de energía establecida por la norma NTC – 5721, la gráfica está comprendida por las unidades N (newton) y mm (milímetros), la unidad Joule es equivalente a N·m, por lo tanto, se aplica un factor de conversión.

$$\text{Absorción de energía} = 3.83 \, J$$

Gráfico 22. Esfuerzo a la flexión CS-V2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(1 \times 10^8)x^4 + 8 \times 10^6 x^3 - 750817x^2 + 392585x + 742.16$$

$$\text{Limite Superior} = 0.08390 \quad \text{Limite Inferior} = 0.00$$

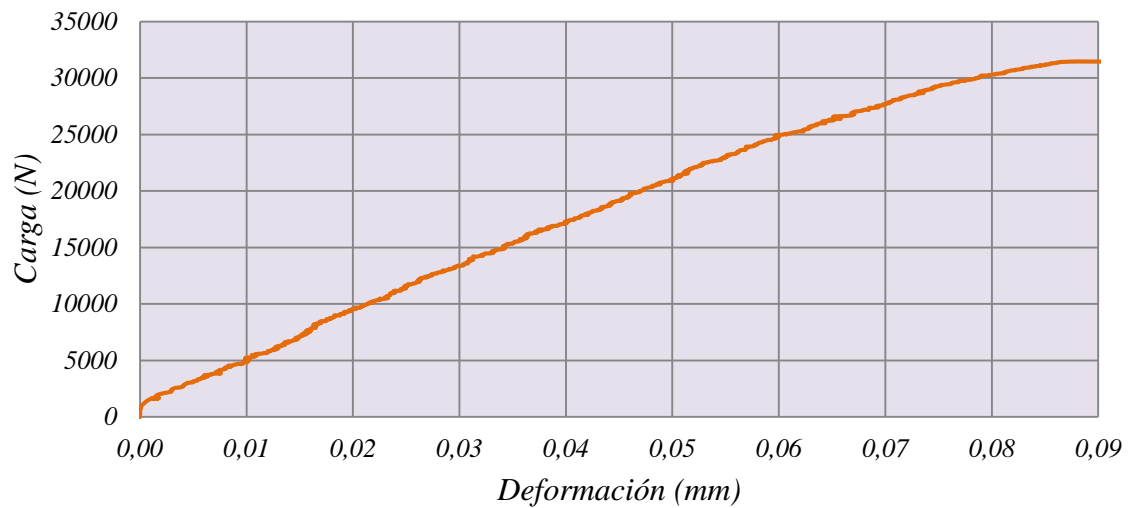
Área bajo la curva:

$$A = \int_{0.00}^{0.08390} -(1 \times 10^8)x^4 + 8 \times 10^6 x^3 - 750817x^2 + 392585x + 742.16 \, dx$$

$$A = 1312.16$$

$$\text{Absorción de energía} = 1.31 \, J$$

Gráfico 23. Esfuerzo a la flexión CS-V3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(2 \times 10^8)x^4 + 2 \times 10^7x^3 - 1 \times 10^6x^2 + 436920x + 938.6$$

$$\text{Limite Superior} = 0.08810 \quad \text{Limite Inferior} = -0.00020$$

Área bajo la curva:

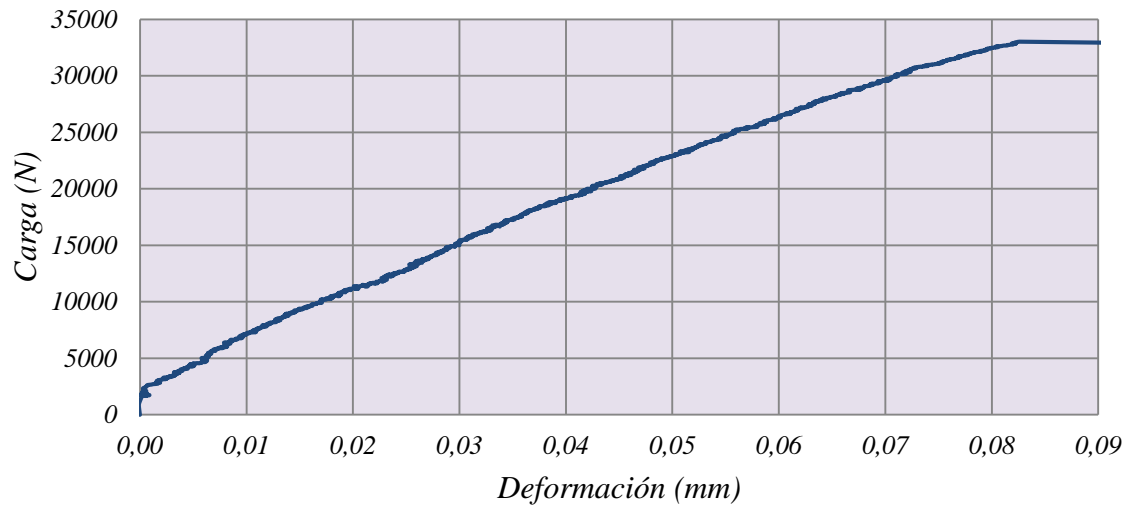
$$A = \int_{-0.00020}^{0.08810} -(2 \times 10^8)x^4 + 2 \times 10^7x^3 - 1 \times 10^6x^2 + 436920x + 938.6 \, dx$$

$$A = 1639.46$$

$$\text{Absorción de energía} = 1.64 \, J$$

Especímenes de CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 24. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = 4 \times 10^6 x^3 - 2 \times 10^6 x^2 + 491628x + 1971.3$$

$$\text{Limite Superior} = 0.08260 \quad \text{Límite Inferior} = -0.00010$$

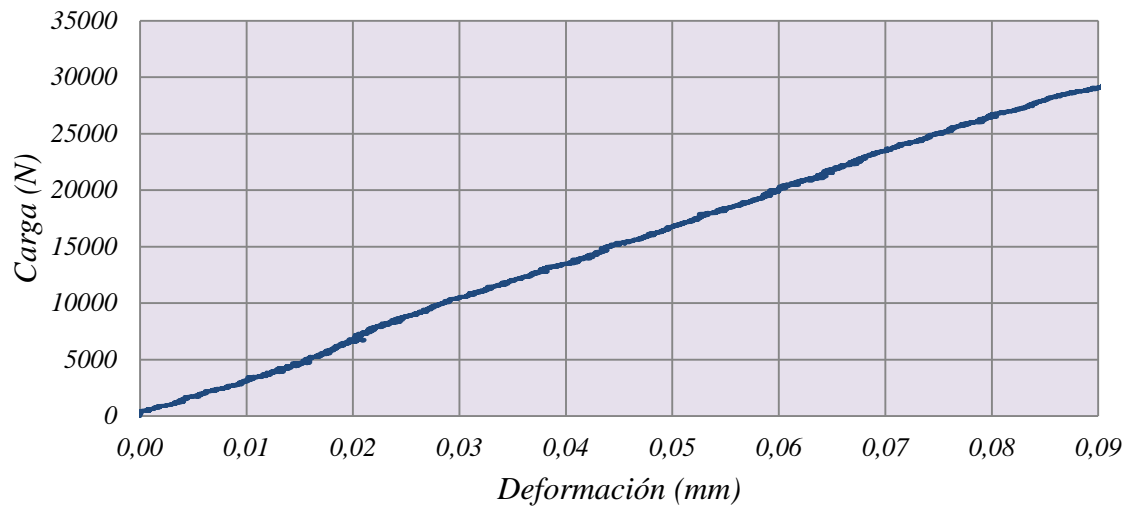
Área bajo la curva:

$$A = \int_{-0.00010}^{0.08260} (4 \times 10^6 x^3 - 2 \times 10^6 x^2 + 491628x + 1971.3) dx$$

$$A = 1511.00$$

*Absorción de energía = 1.51 J*

Gráfico 25. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(5 \times 10^6)x^3 + 332127x^2 + 333707x - 9.74$$

$$\text{Limite Superior} = 0.09560 \quad \text{Limite Inferior} = -0.00010$$

Área bajo la curva:

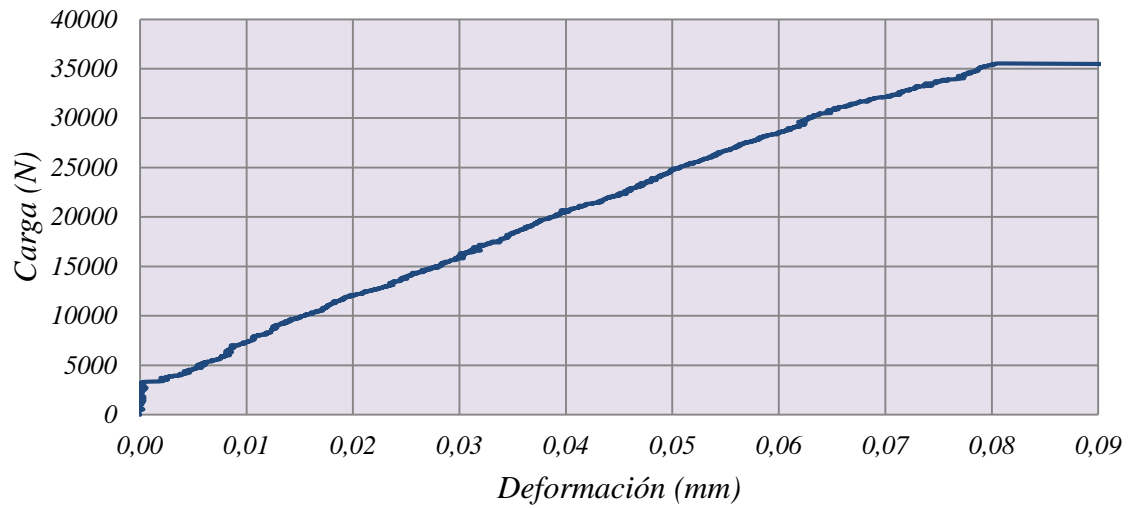
$$A = \int_{-0.00010}^{0.09560} -(5 \times 10^6)x^3 + 332127x^2 + 333707x - 9.74 \, dx$$

$$A = 1516.32$$

*Absorción de energía = 1.52 J*



Gráfico 26. Esfuerzo a la flexión CRFAD5-V3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = 3 \times 10^6 x^3 - 1 \times 10^6 x^2 + 518091x + 2026.6$$

$$\text{Limite Superior} = 0.08060 \quad \text{Límite Inferior} = -0.00050$$

Área bajo la curva:

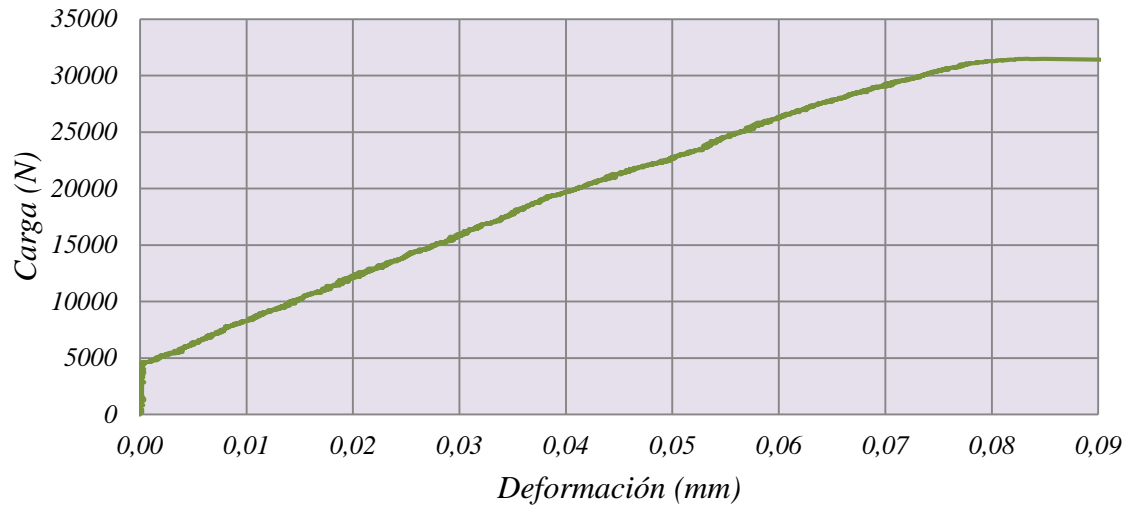
$$A = \int_{-0.00050}^{0.08060} (3 \times 10^6 x^3 - 1 \times 10^6 x^2 + 518091x + 2026.6) dx$$

$$A = 1704.26$$

Absorción de energía = 1.70 J

Especímenes de CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 27. Esfuerzo a la flexión CRFAD9-V1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(1 \times 10^9)x^4 + 2 \times 10^8x^3 - 1 \times 10^7x^2 + 654142x + 2718.1$$

Límite Superior= 0.08330    Límite Inferior= -0.00060

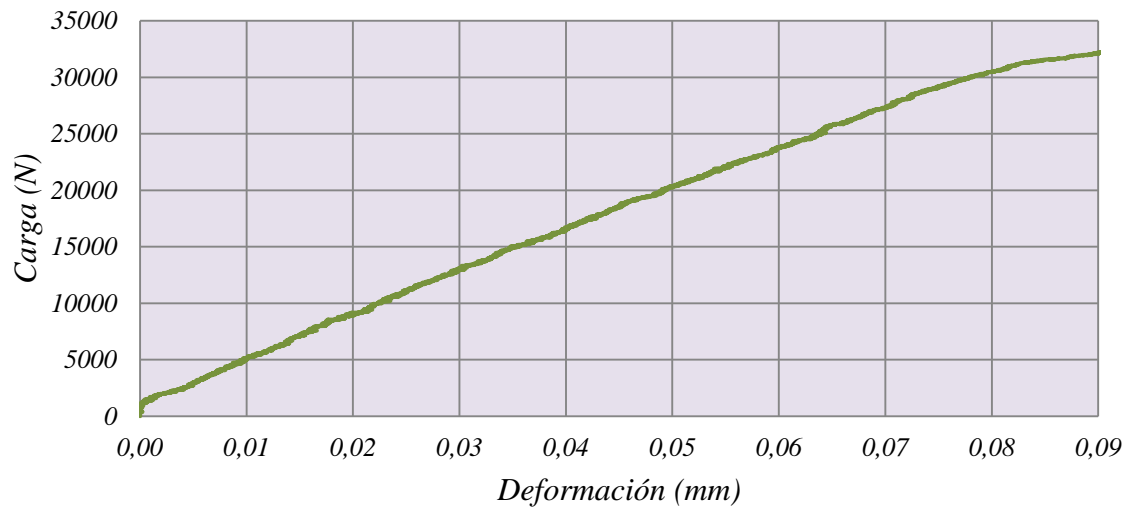
Área bajo la curva:

$$A = \int_{-0.00060}^{0.08330} -(1 \times 10^9)x^4 + 2 \times 10^8 x^3 - 1 \times 10^7 x^2 + 654142x + 2718.1 dx$$

$$A = 2176$$

$$\text{Absorción de energía} = 2.18 J$$

Gráfico 28. Esfuerzo a la flexión CRFAD9-V2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(4 \times 10^8)x^4 + 7 \times 10^7 x^3 - 4 \times 10^6 x^2 + 477174x + 719.81$$

$$\text{Limite Superior} = 0.09260 \quad \text{Limite Inferior} = -0.00050$$

Área bajo la curva:

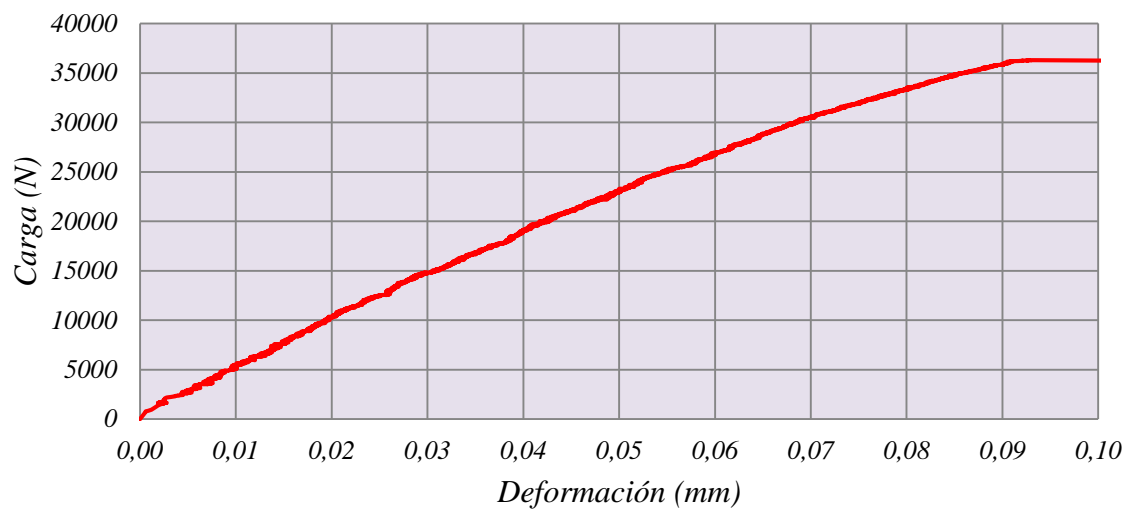
$$A = \int_{-0.00050}^{0.09260} -(4 \times 10^8)x^4 + 7 \times 10^7 x^3 - 4 \times 10^6 x^2 + 477174x + 719.81 dx$$

$$A = 1796.11$$

$$\text{Absorción de energía} = 1.80 \text{ J}$$

Especímenes de CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 29. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(4 \times 10^9)x^5 + 7 \times 10^8x^4 - 5 \times 10^7x^3 + 330185x^2 + 497457x + 396.06$$

$$\text{Limite Superior} = 0.09360 \quad \text{Límite Inferior} = 0.00$$

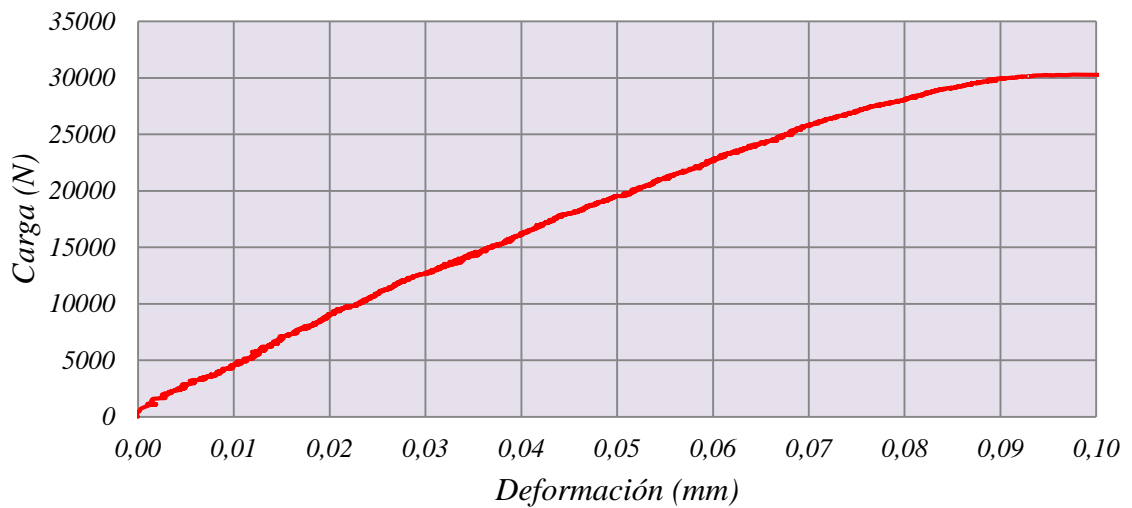
Área bajo la curva:

$$A = \int_{0.00}^{0.09360} -(4 \times 10^9)x^5 + 7 \times 10^8x^4 - 5 \times 10^7x^3 + 330185x^2 + 497457x + 396.06 \, dx$$

$$A = 1904.49$$

$$\text{Absorción de energía} = 1.90 \, J$$

Gráfico 30. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(8 \times 10^9)x^5 + 2 \times 10^9x^4 - 1 \times 10^8x^3 + 2 \times 10^6x^2 + 411864x + 548.51$$

$$\text{Limite Superior} = 0.09760 \quad \text{Limite Inferior} = -0.00020$$

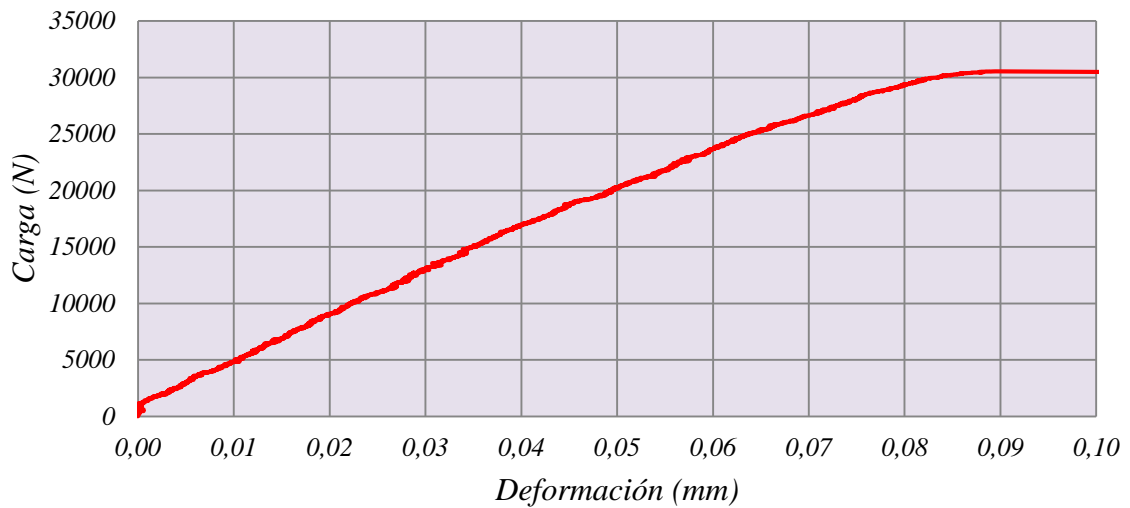
Área bajo la curva:

$$A = \int_{-0.00020}^{0.09760} -(8 \times 10^9)x^5 + 2 \times 10^9 x^4 - 1 \times 10^8 x^3 + 2 \times 10^6 x^2 + 411864x + 548.51 \, dx$$

$$A = 2756.6$$

$$\text{Absorción de energía} = 2.76 \, J$$

Gráfico 31. Esfuerzo a la flexión CRFAD18-V3



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la curva

$$y = -(8 \times 10^9)x^5 + 2 \times 10^9 x^4 - 1 \times 10^8 x^3 + 3 \times 10^6 x^2 + 381689x + 886.62$$

$$\text{Limite Superior} = 0.08950 \quad \text{Limite Inferior} = -0.00020$$

Área bajo la curva:

$$A = \int_{-0.00020}^{0.08950} -(8 \times 10^9)x^5 + 2 \times 10^9x^4 - 1 \times 10^8x^3 + 3 \times 10^6x^2 + 381689x + 886.62 \, dx$$

$$A = 2331.83$$

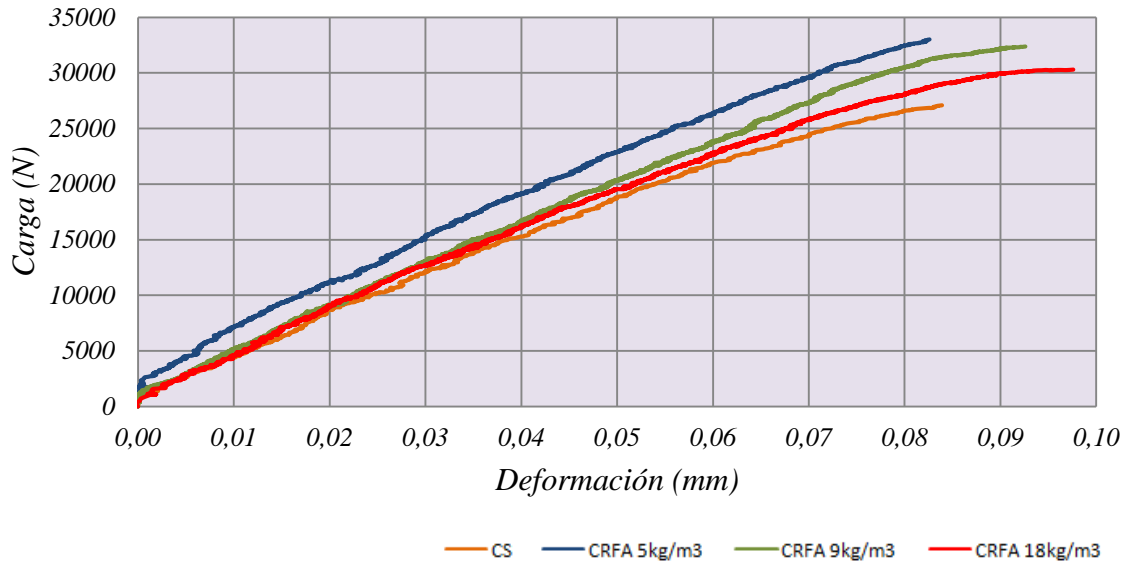
$$\text{Absorción de energía} = 2.33 \, J$$

Tabla 11. Resistencia del concreto a flexión, Absorción de energía (tenacidad)

ID viga	Carga máxima	Tenacidad
	(N)	(J)
CS-V-1	31304	3.83
CS-V-2	27089	1.31
CS-V-3	31455	1.64
CRFAD5-V1	33011	1.51
CRFAD5-V2	30161	1.52
CRFAD5-V3	35545	1.70
CRFAD9-V1	31476	2.18
CRFAD9-V2	32373	1.80
CRFAD18-V1	36303	1.90
CRFAD18-V2	30298	2.76
CRFAD18-V3	30549	2.33

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 32. Carga – deformación, vigas vs CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

#### 10.4 Absorción de Energía, tenacidad del concreto (NTC -5721)

Por medio de este ensayo se determina el comportamiento carga contra deflexión de una probeta de concreto reforzada con fibra, con el objetivo de calcular la capacidad de absorción de energía del elemento hasta una deflexión específica.

Para realizar el ensayo de Absorción de energía, se toman losas con dimensiones (0.60 m x 0.60 m x 0.10 m), elaboradas en CS, CS con malla electrosoldada, y CRFA de las tres dosificaciones objeto de estudio (5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup>); se observa su comportamiento de carga contra flexión, y se determina la capacidad de absorción de energía y su comportamiento ante condiciones extremas de flexión; la NTC-5721 recomienda llevar las losas a una deformación de 30 mm, sin embargo, para este estudio los especímenes se llevan hasta una deformación máxima de 45 mm. La energía absorbida que se reporta corresponde al área bajo la curva de carga contra deflexión entre el rango de 0 mm a 25 mm de deflexión.



Tabla 12. Absorción de Energía

ID Losa	Edad (días)	Peso (Kg)	Carga máxima (N)	Resistencia Max. (MPa)	$\epsilon$ Max. Antes de la rotura(mm)	Tenacidad J (N*m)
CS-L1	105	85.10	44468	44.5	2.78	157.63
CSMALLA-L1	105	85.25	43270	43.30	15.12	730.89
CSMALLA-L2	174	85.13	50279	50.30	10.03	967.64
CFRA D5-L1	174	85.20	30526	39.50	1.96	489.74
CFRA D5-L2	174	85.16	31660	31.70	1.38	241.45
CFRA D9-L1	174	85.00	33131	33.10	2.09	458.98
CFRA D9-L2	174	85.06	31971	32.00	1.66	474.01
CFRA D18-L1	174	85.10	47541	47.50	8.95	797.10
CFRA D18-L2	174	85.25	34710	34.70	4.87	565.63

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Figura 32. Absorción de energía, montaje sobre marco de carga

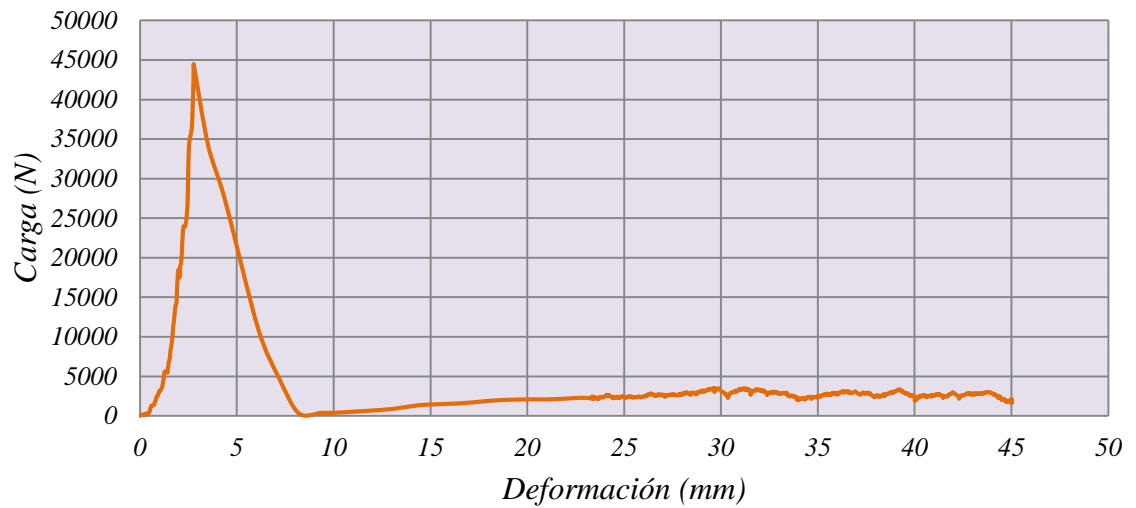


Figura 33. Absorción de energía, losa fallada



Especimen de CS

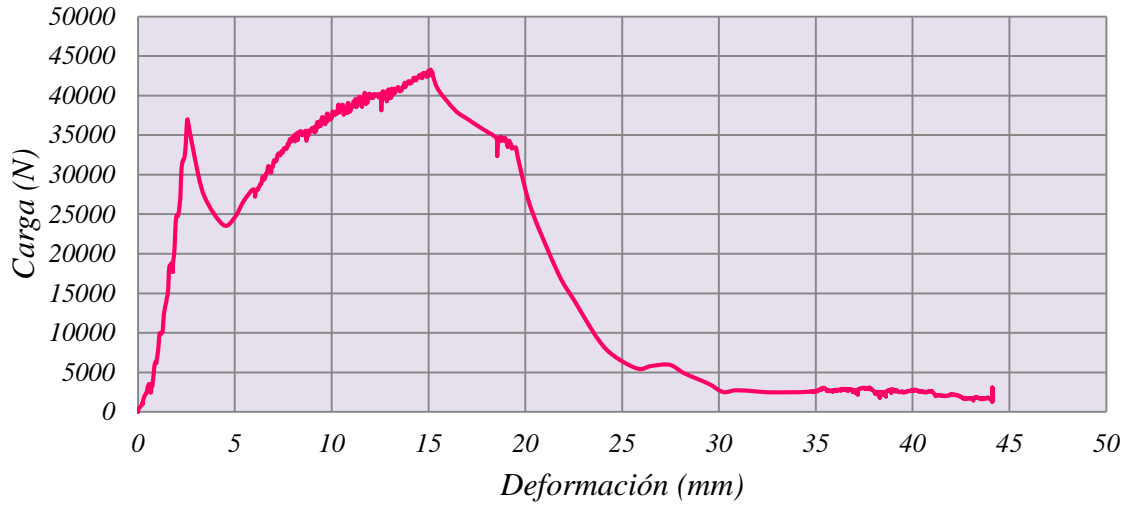
Gráfico 33. Carga – deformación CS-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

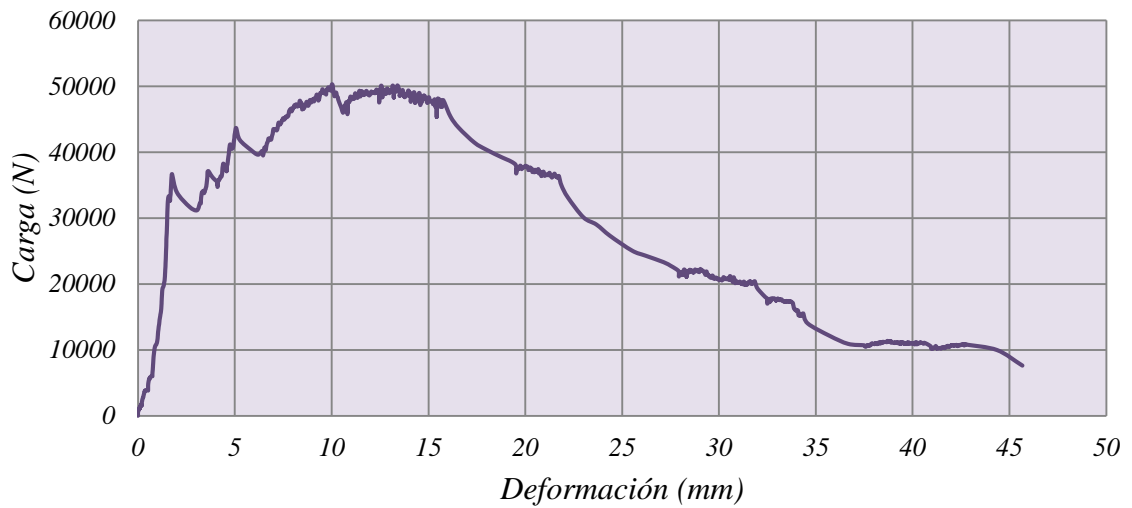
Especímenes de CS con malla electrosoldada (D-188)

Gráfico 34. Carga – deformación CSMALLA-L1



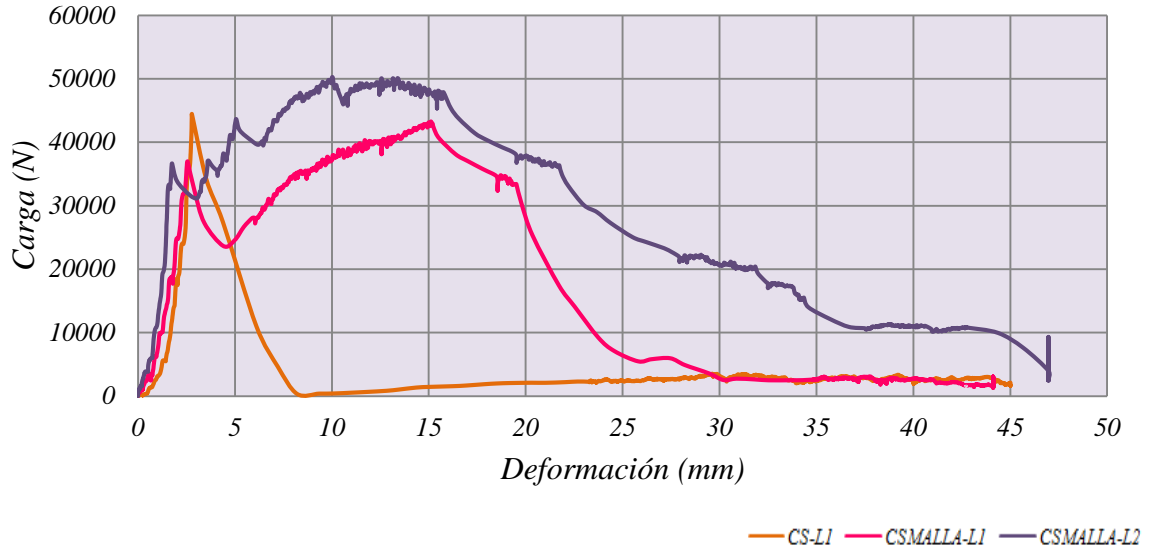
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 35. Carga – deformación CSMALLA-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

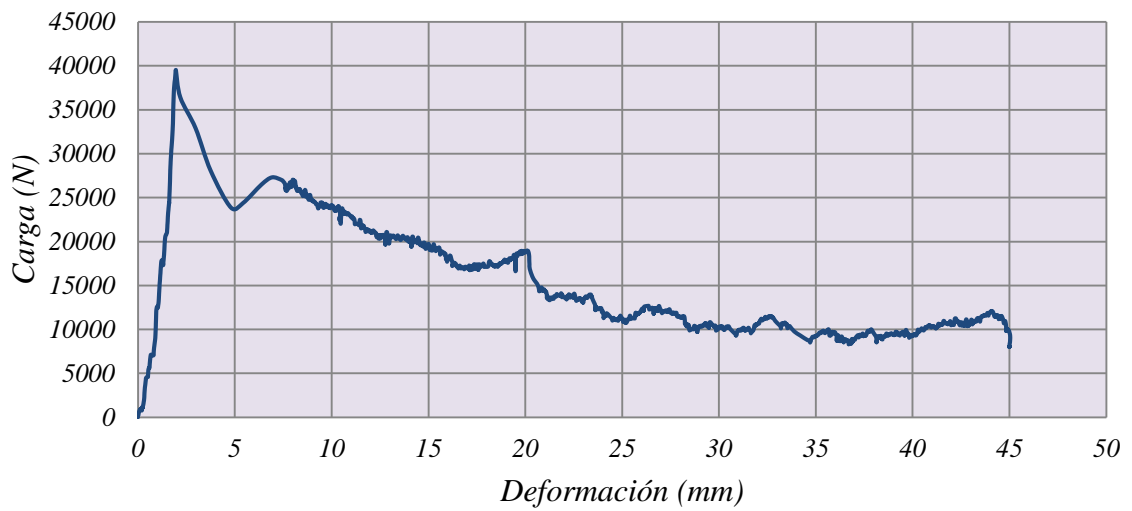
Gráfico 36. Losas en CS vs CS con malla electrosoldada



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

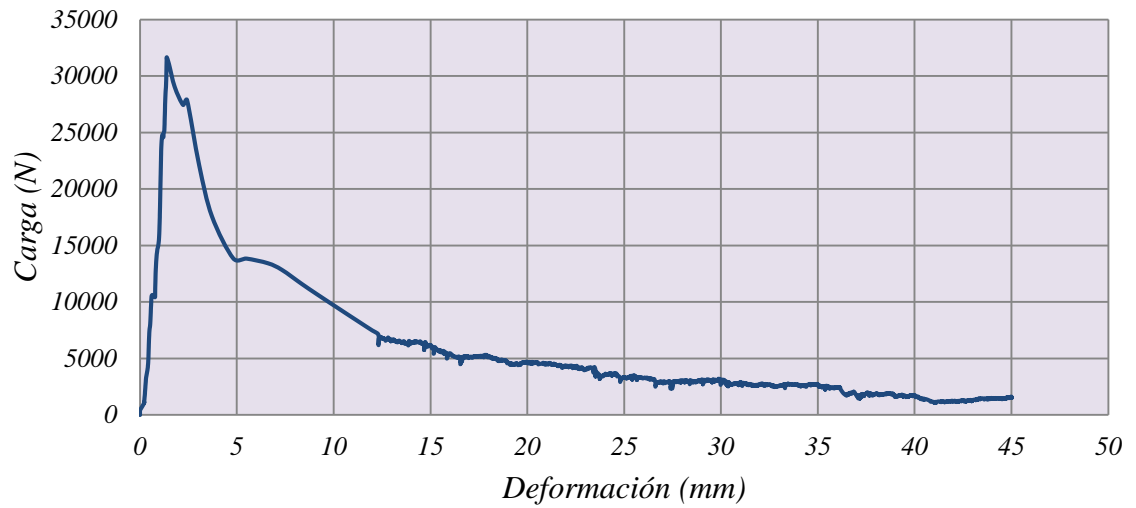
Especímenes de CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 37. Carga – deformación CRFA D5-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 38. Carga – deformación CRFA D5-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Especímenes de CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 39. Carga – deformación CRFA D9-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

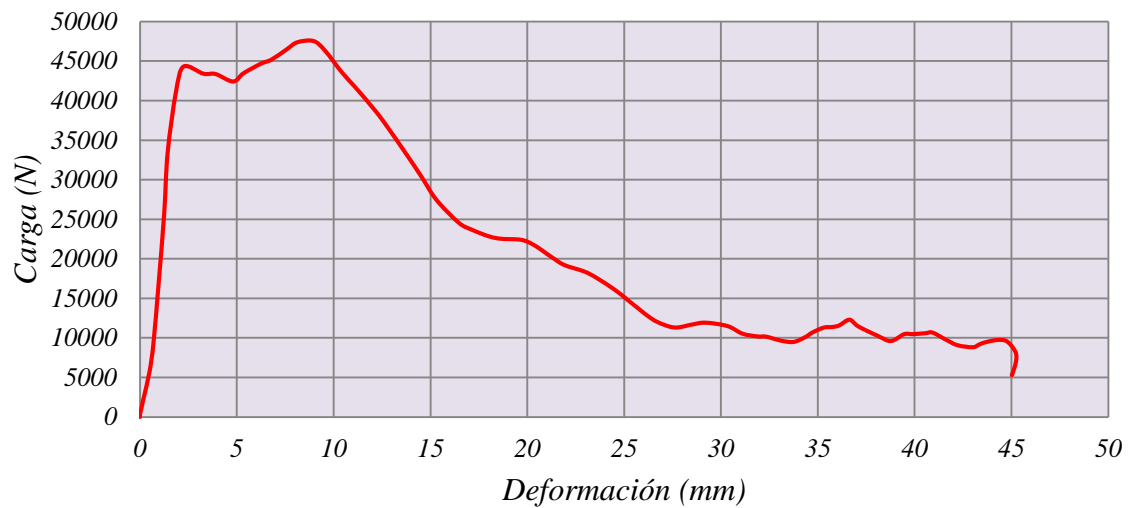
Gráfico 40. Carga – deformación CRFA D9-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

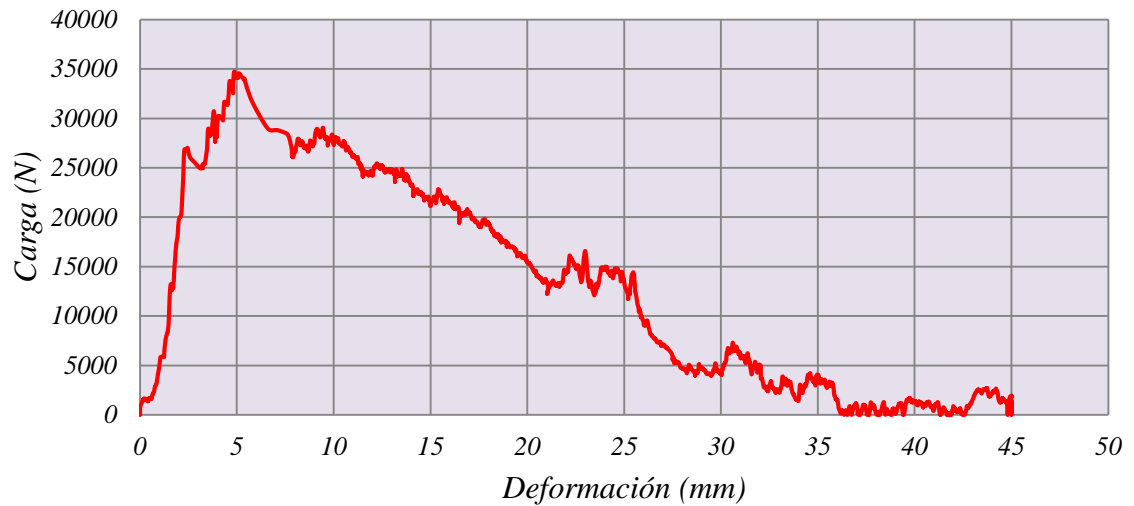
Especímenes de CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 41. Carga – deformación CRFA D18-L1



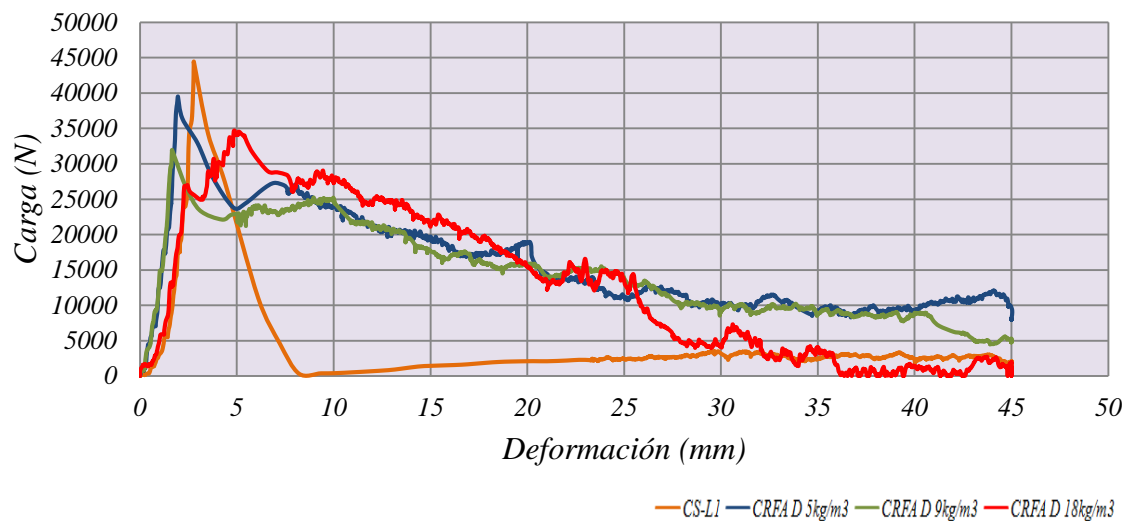
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 42. Carga – deformación CRFA D18-L1



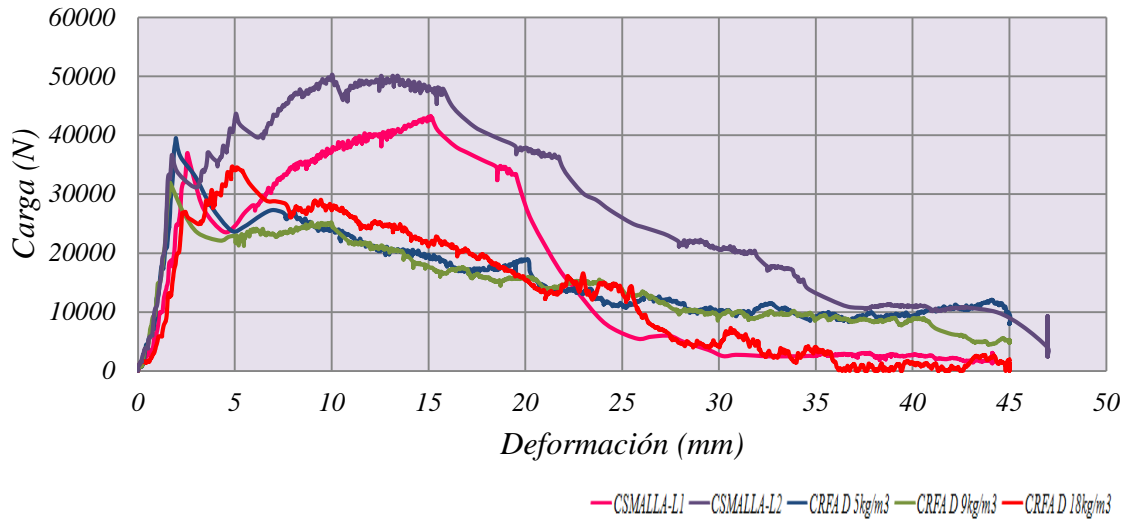
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 43. Carga – deformación, losas en CS vs CRFA



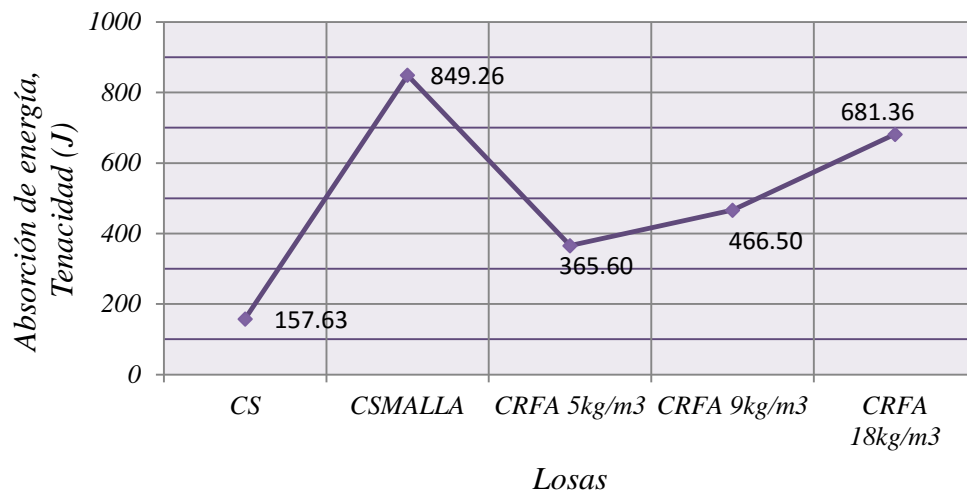
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 44. Carga – deformación, losas en CS-MALLA vs CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

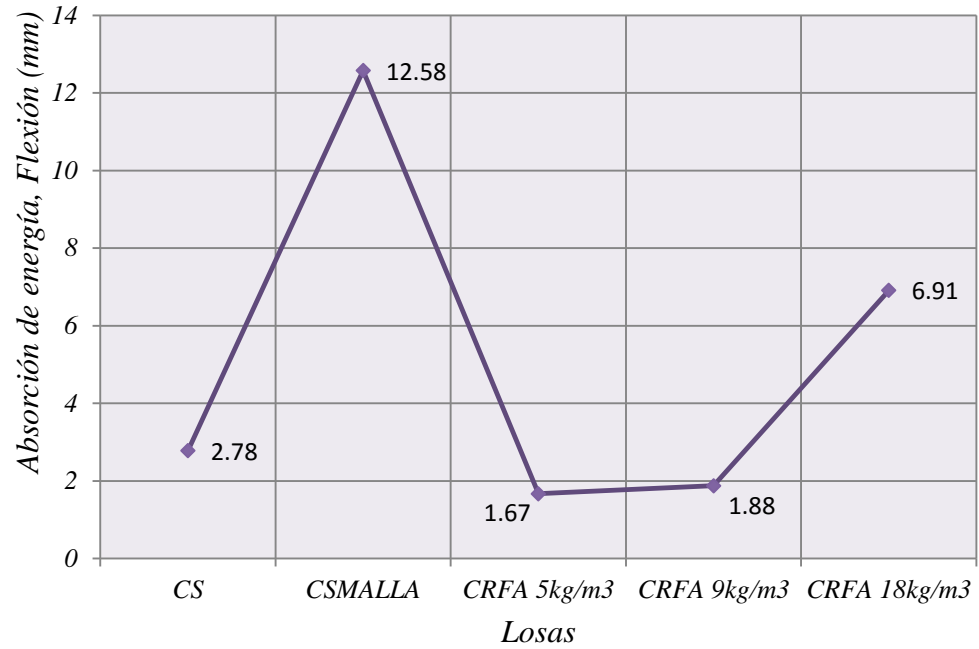
Gráfico 45. Absorción de energía, Tenacidad (J)



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

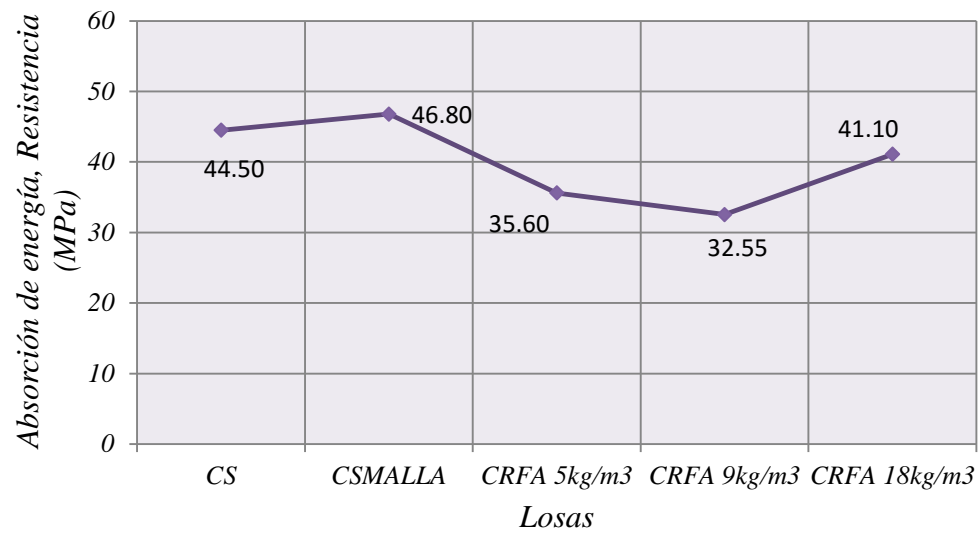
Gráfico 46. Absorción de energía, Flexión (mm)





Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 47. Absorción de energía, Resistencia (MPa)



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

### 10.4.1 Comportamiento a 1 mm

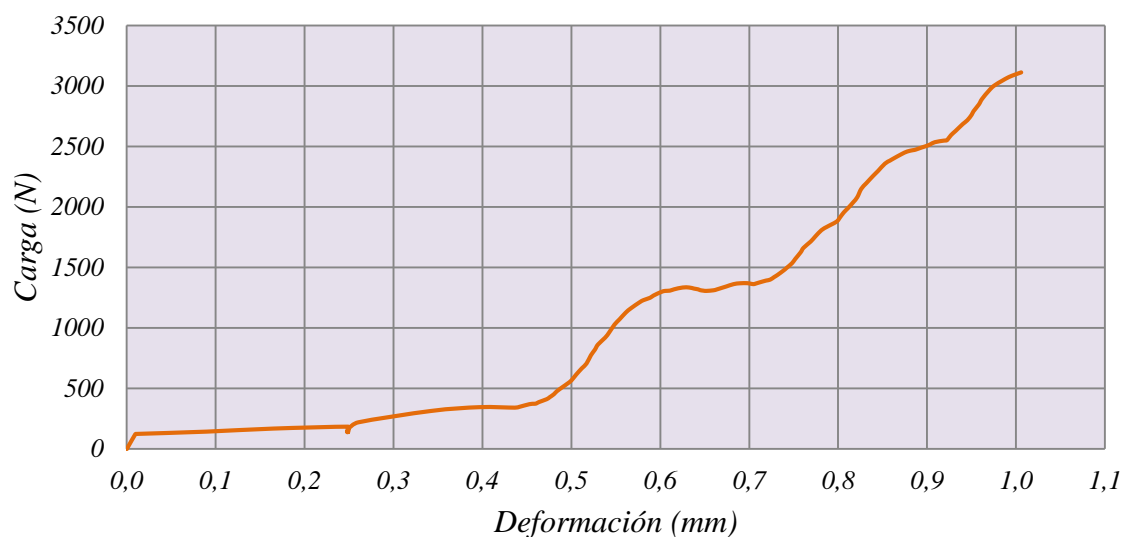
Tabla 13. Absorción de Energía (Tenacidad), Comportamiento a 1mm

ID Losa	Tenacidad J (N*m)
CS-L1	1.00
CSMALLA-L1	2.99
CSMALLA-L2	5.10
CFRA D5-L1	12.57
CFRA D5-L2	7.15
CFRA D9-L1	2.79
CFRA D9-L2	5.32
CFRA D18-L1	7.01
CFRA D18-L2	2.12

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Espécimen de CS

Gráfico 48. Carga – deformación a 1 mm CS-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 25869x^5 - 65803x^4 + 58606x^3 - 17438x^2 + 1868x + 79.60$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

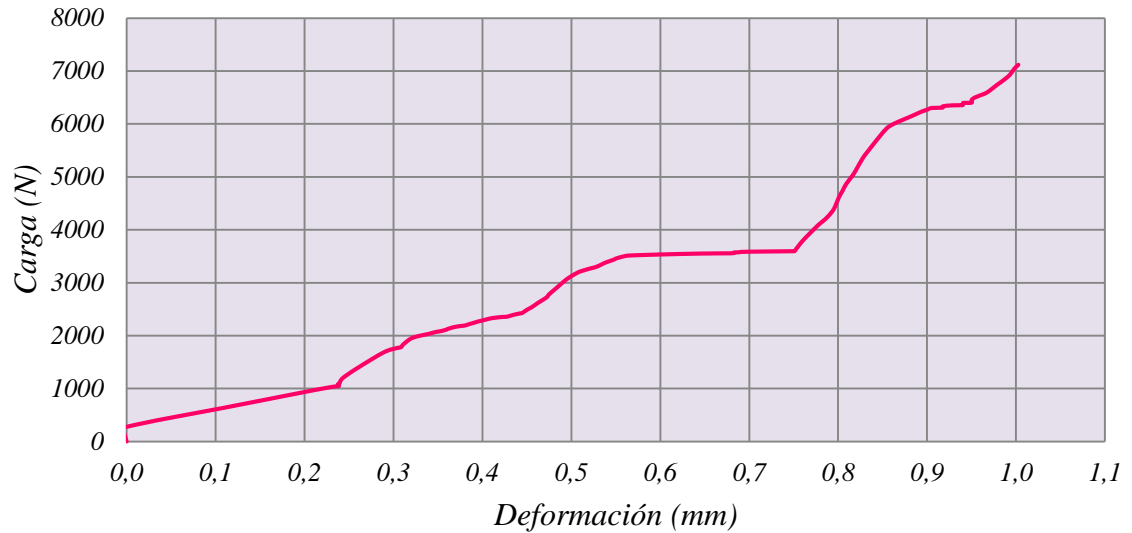
$$A = \int_0^1 25869x^5 - 65803x^4 + 58606x^3 - 17438x^2 + 1868x + 79.60 \, dx$$

$$A = 1003.33$$

$$\text{Absorción de energía} = 1.00 \, J$$

Especímenes de CS con malla electrosoldada (D-188)

Gráfico 49. Carga – deformación a 1mm CSMALLA-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 21731x^4 - 37994x^3 + 22447x^2 + 1038.6x + 136.38$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

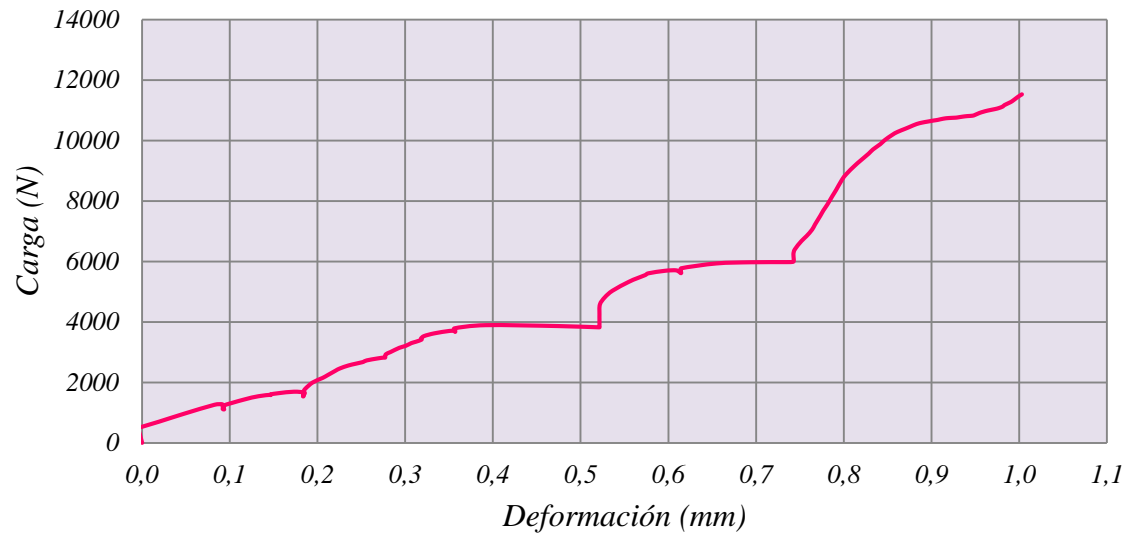
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 21731x^4 - 37994x^3 + 22447x^2 + 1038.6x + 136.38 \, dx$$

$$A=2985.71$$

$$\text{Absorción de energía} = 2.99 \, J$$

Gráfico 50. Carga – deformación a 1mm CSMALLA-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -27021x^4 + 63918x^3 - 42415x^2 + 17357x - 15.38$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

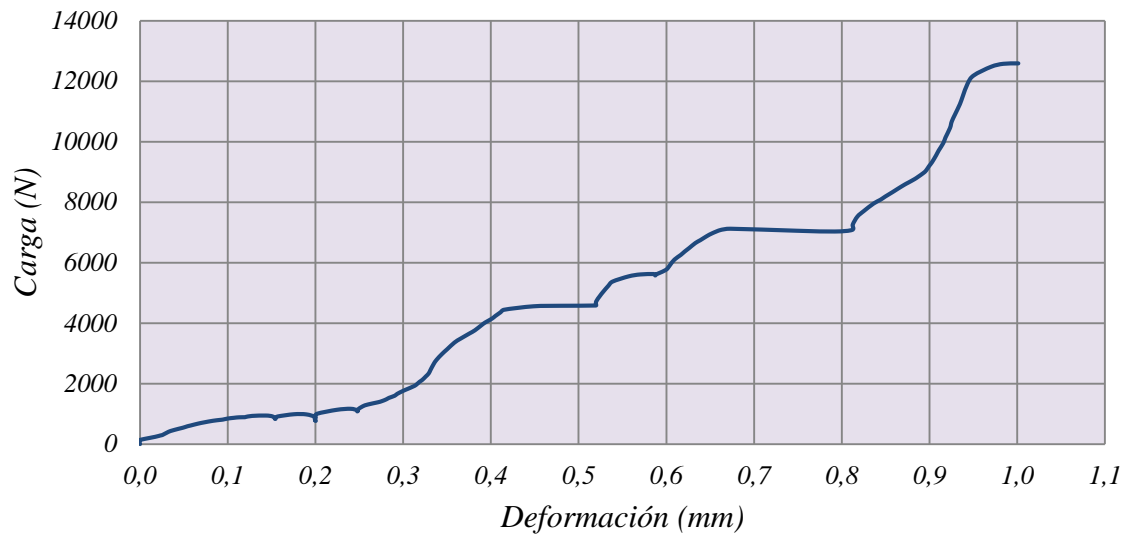
$$A = \int_0^1 -27021x^4 + 63918x^3 - 42415x^2 + 17357x - 15.38 \, dx$$

$$A = 5100.08$$

$$\text{Absorción de energía} = 5.10 \, J$$

Especímenes de CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 51. Carga – deformación a 1mm CRFA D5-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -644465x^6 + 2x10^6x^5 - 2x10^6x^4 + 1x10^6x^3 - 274196x^2 + 25604x - 97.384$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

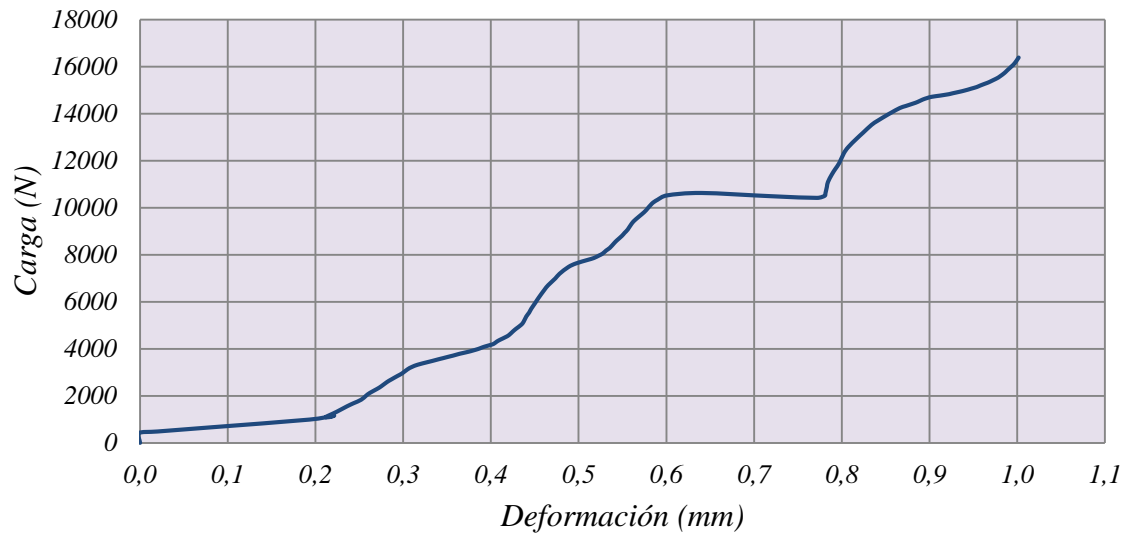
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 -644465x^6 + 2x10^6x^5 - 2x10^6x^4 + 1x10^6x^3 - 274196x^2 + 25604x - 97.384 dx$$

$$A = 12572.9$$

$$\text{Absorción de energía} = 12.57 J$$

Gráfico 52. Carga – deformación a 1mm CRFA D5-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 116647x^5 - 229423x^4 + 107289x^3 + 26752x^2 - 5163.7x + 430.76$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

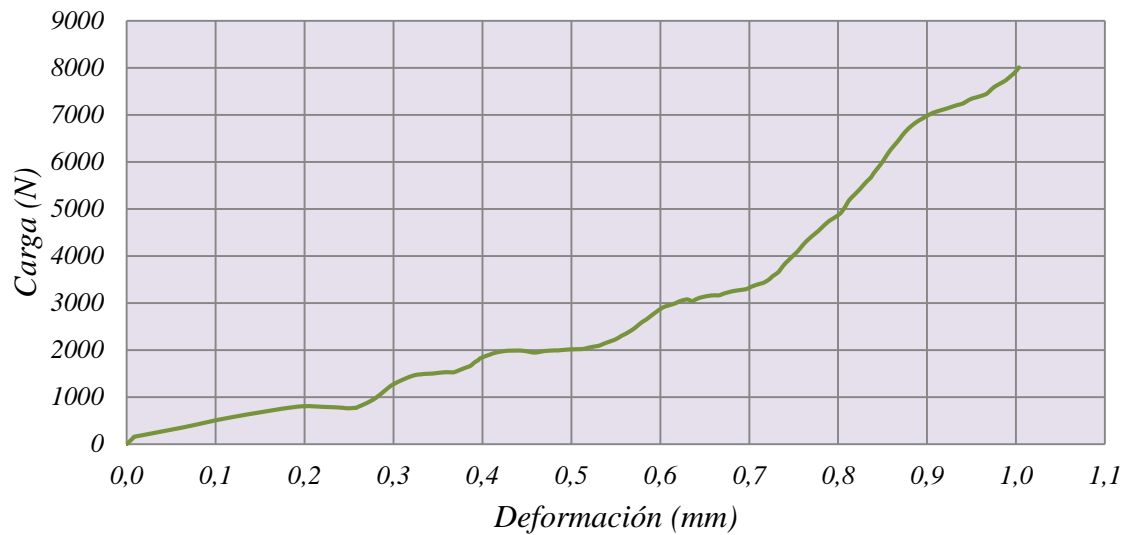
$$A = \int_0^1 116647x^5 - 229423x^4 + 107289x^3 + 26752x^2 - 5163.7x + 430.76 dx$$

$$A = 7145.06$$

$$\text{Absorción de energía} = 7.15 J$$

Especímenes de CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 53. Carga – deformación a 1mm CRFA D9-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -10377x^4 + 30822x^3 - 19773x^2 + 7702x - 99.86$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

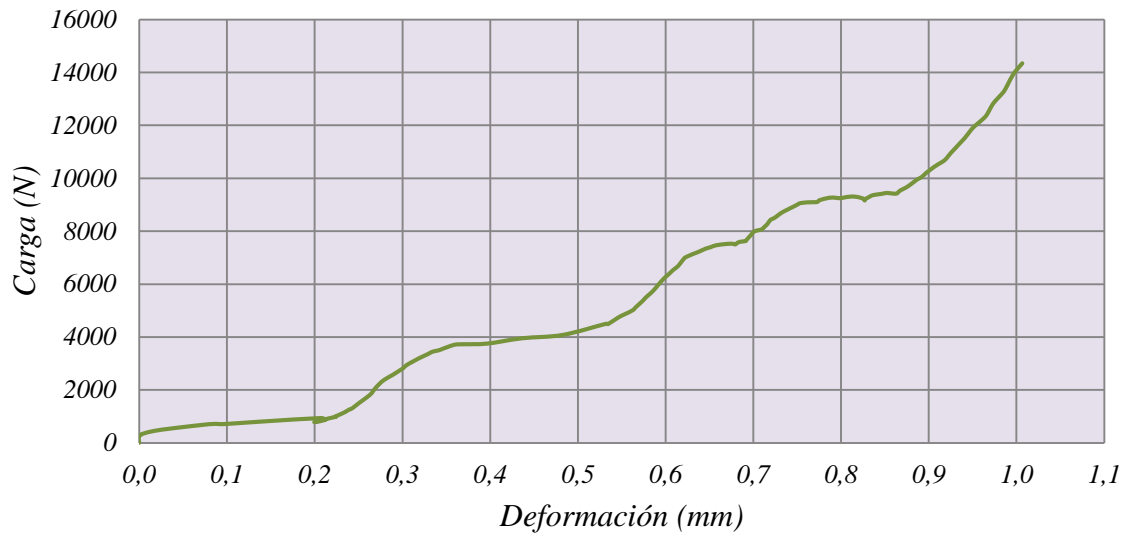
$$A = \int_0^1 -10377x^4 + 30822x^3 - 19773x^2 + 7702x - 99.86 \, dx$$

$$A = 2790.24$$

$$\text{Absorción de energía} = 2.79 \, J$$



Gráfico 54. Carga – deformación a 1mm CRFA D9-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 113370x^5 - 238431x^4 + 159712x^3 - 27154x^2 + 5990.5x + 242.53$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

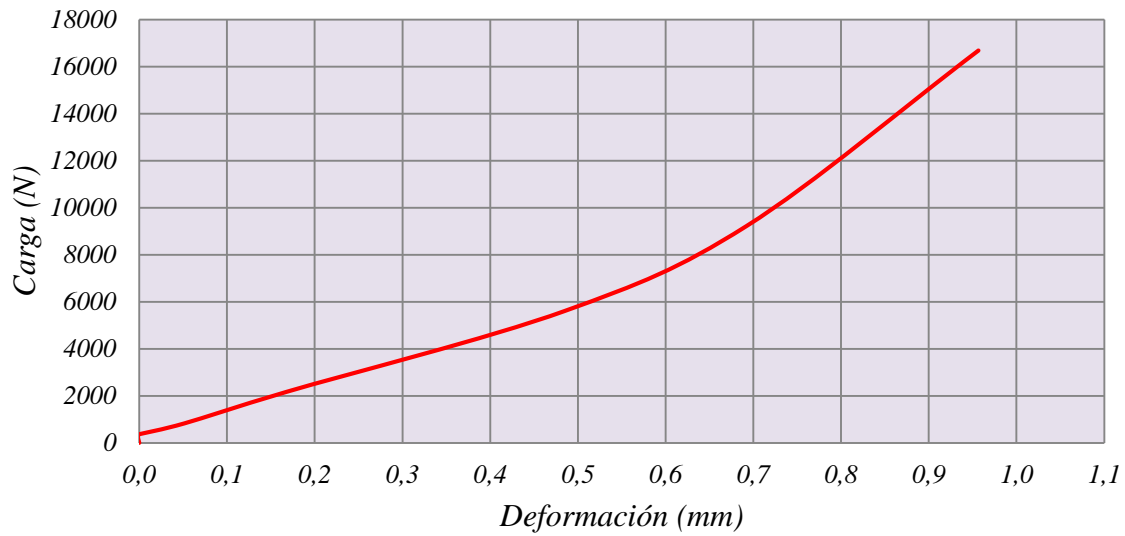
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 113370x^5 - 238431x^4 + 159712x^3 - 27154x^2 + 5990.5x + 242.53 \, dx$$

$$A = 5323.25$$

$$\text{Absorción de energía} = 5.32 \, J$$

Gráfico 55. Carga – deformación a 1mm CRFA D18-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 16197x^3 - 10534x^2 + 12448x + 247.03$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

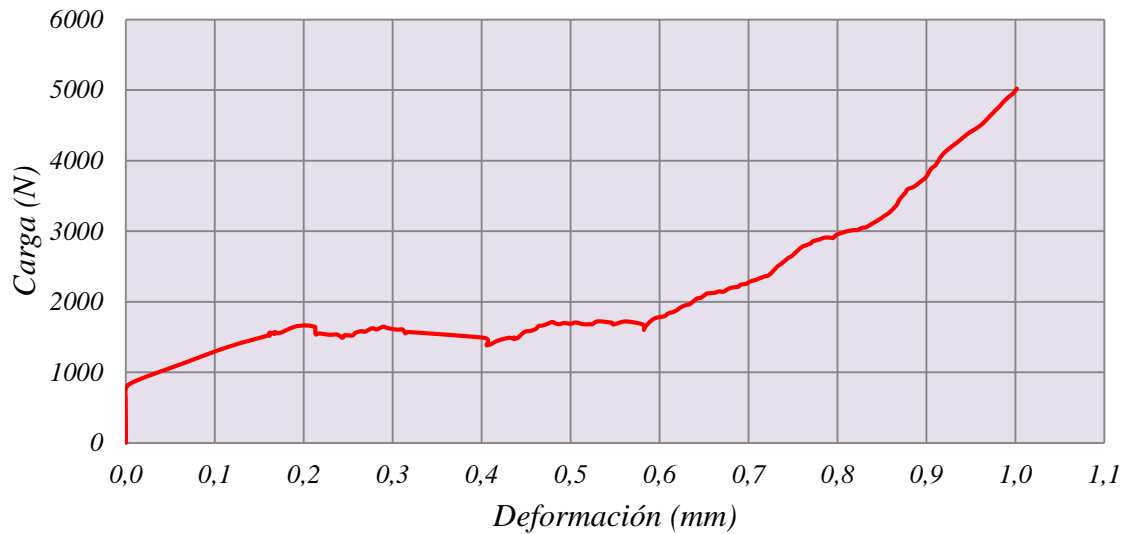
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 16197x^3 - 10534x^2 + 12448x + 247.03 \, dx$$

$$A = 7008.95$$

$$\text{Absorción de energía} = 7.01 \, J$$

Gráfico 56. Carga – deformación a 1mm CRFA D18-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -15049x^4 + 43171x^3 - 33852x^2 + 10112x + 563.57$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

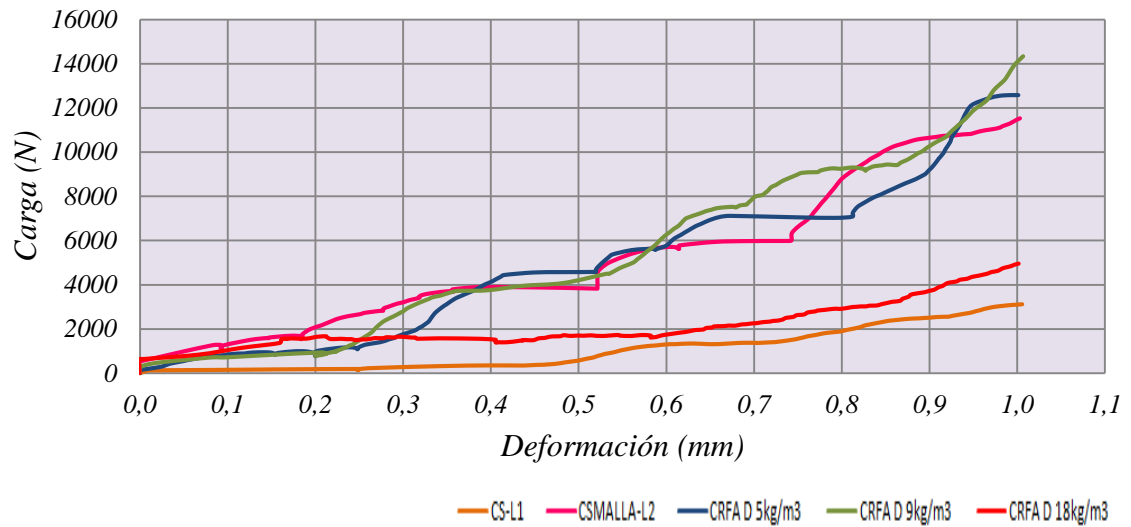
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 -15049x^4 + 43171x^3 - 33852x^2 + 10112x + 563.57 dx$$

$$A = 2118.52$$

$$\text{Absorción de energía} = 2.12 J$$

Gráfico 57. Carga – deformación a 1mm, losas en CS, CS-MALLA vs CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

#### 10.4.2 Comportamiento a 3 mm

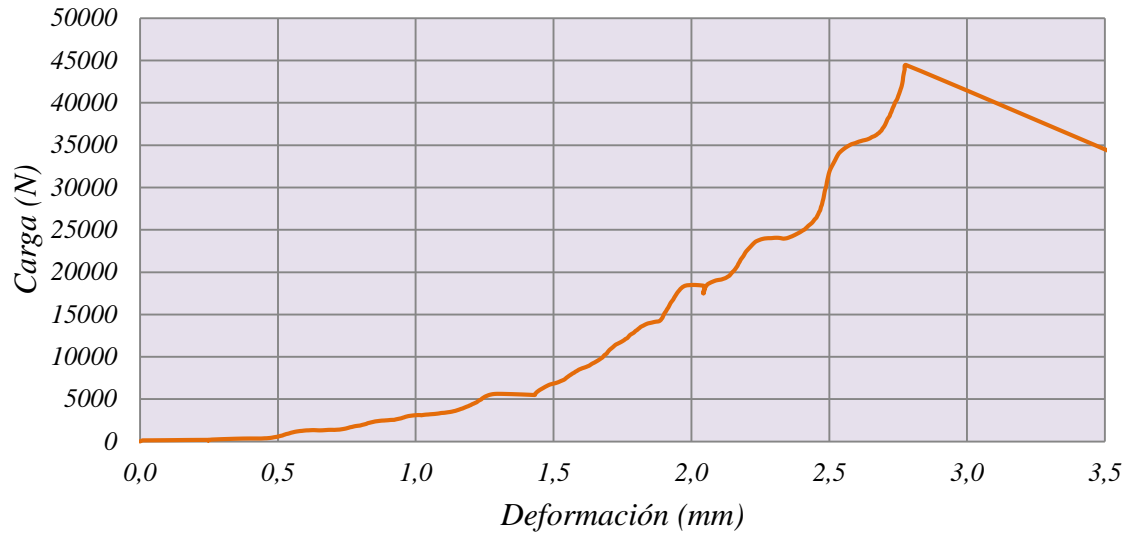
Tabla 14. Absorción de Energía Comportamiento a 3mm

ID Losa	Tenacidad J (N*m)
CS-L1	40.28
CSMALLA-L1	51.48
CSMALLA-L2	68.76
CFRA D5-L1	70.43
CFRA D5-L2	64.72
CFRA D9-L1	52.47
CFRA D9-L2	59.07
CFRA D18-L1	84.77
CFRA D18-L2	38.80

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Espécimen de CS

Gráfico 58. Carga – deformación a 3mm CS-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -1731.2x^5 + 11987x^4 - 27879x^3 + 31321x^2 - 11834x + 1320.5$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

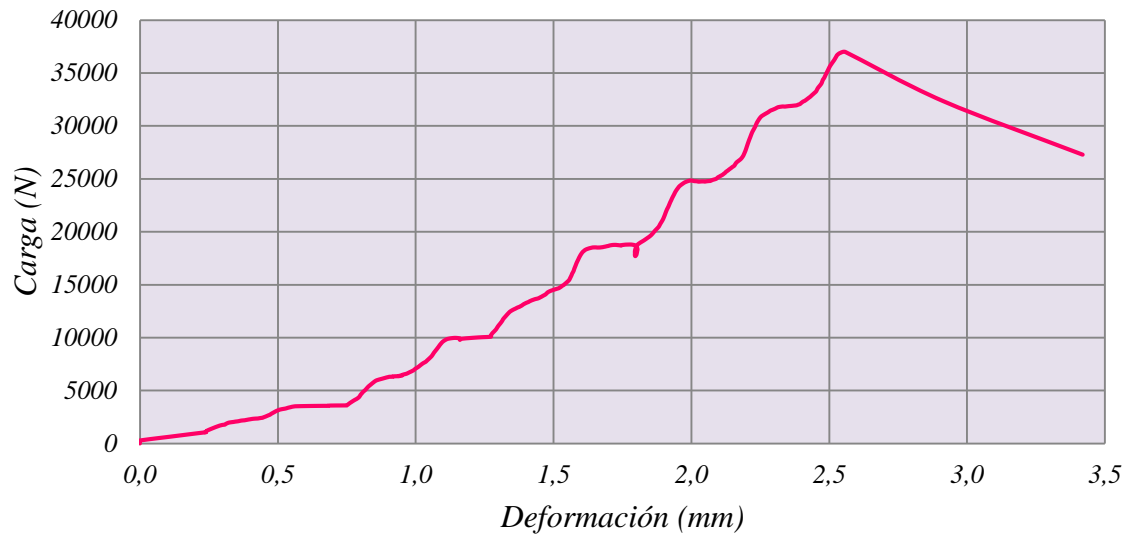
$$A = \int_0^3 -1731.2x^5 + 11987x^4 - 27879x^3 + 31321x^2 - 11834x + 1320.5 \, dx$$

$$A = 40275.2$$

$$\text{Absorción de energía} = 40.28 \, J$$

Especímenes de CS con malla electrosoldada (D-188)

Gráfico 59. Carga – deformación a 3mm CSMALLA-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -843.44x^5 + 4857.6x^4 - 9975.3x^3 + 13446x^2 - 700.7x + 673.87$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

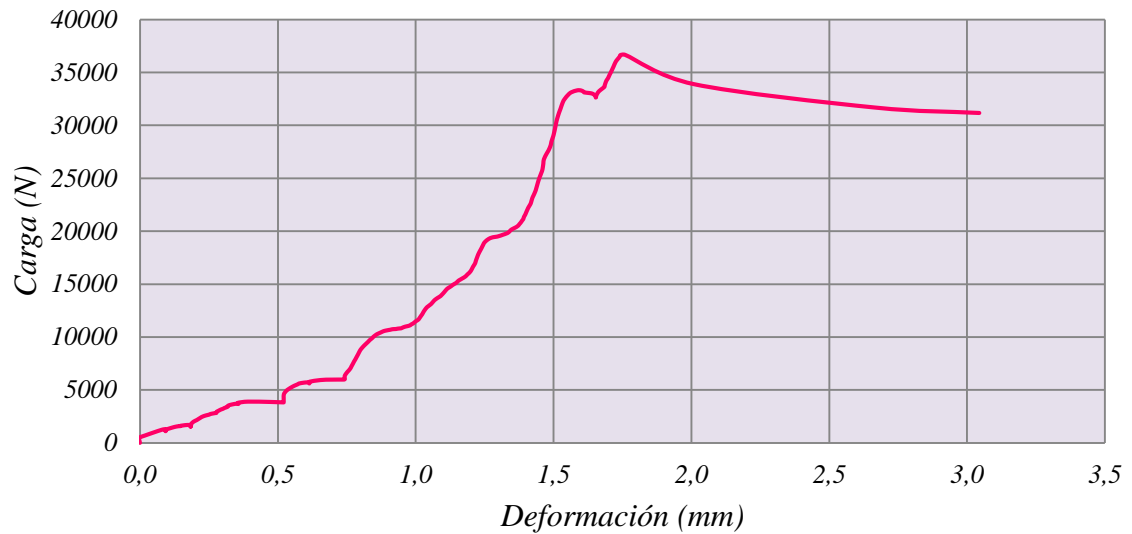
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^3 -843.44x^5 + 4857.6x^4 - 9975.3x^3 + 13446x^2 - 700.7x + 673.87 \, dx$$

$$A = 51484$$

$$\text{Absorción de energía} = 51.48 \, J$$

Gráfico 60. Carga – deformación a 3mm CSMALLA-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 4096.7x^6 - 29355x^5 + 69480x^4 - 62403x^3 + 24014x^2 + 5302.3x + 453.65$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

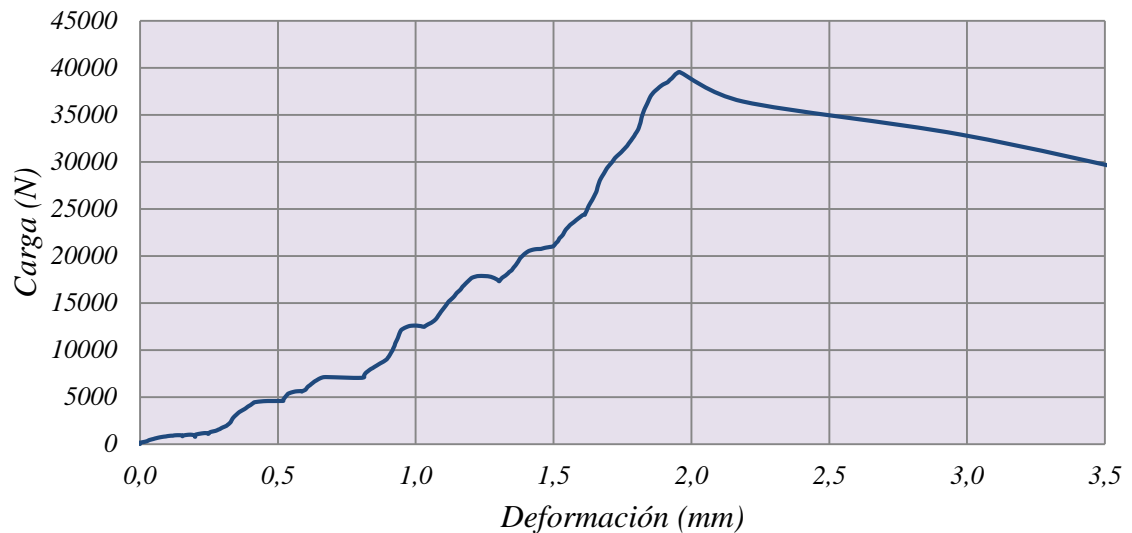
$$A = \int_0^3 4096.7x^6 - 29355x^5 + 69480x^4 - 62403x^3 + 24014x^2 + 5302.3x + 453.65 \, dx$$

$$A = 68762.1$$

$$\text{Absorción de energía} = 68.76 \, J$$

Especímenes de CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 61. Carga – deformación a 3mm CRFA D5-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 1958x^5 - 16919x^4 + 45927x^3 - 41708x^2 + 23142x - 1331.9$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

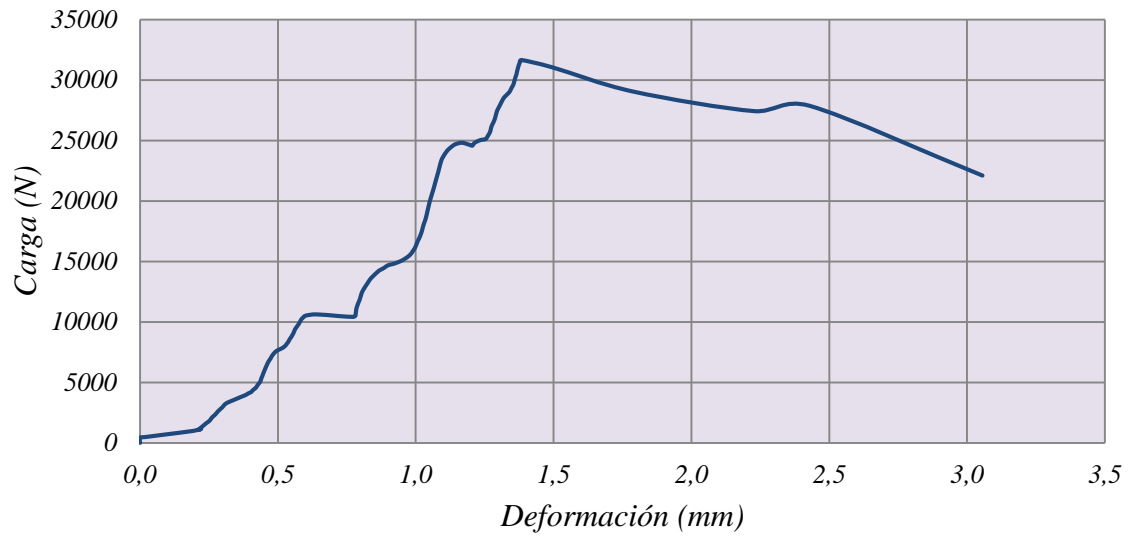
$$A = \int_0^3 1958x^5 - 16919x^4 + 45927x^3 - 41708x^2 + 23142x - 1331.9 \, dx$$

$$A = 70426.7$$

$$\text{Absorción de energía} = 70.43 \, J$$



Gráfico 62. Carga – deformación a 3mm CRFA D5-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 3642.7x^4 - 26020x^3 + 51574x^2 - 12594x + 2365.9$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

Área bajo la curva:

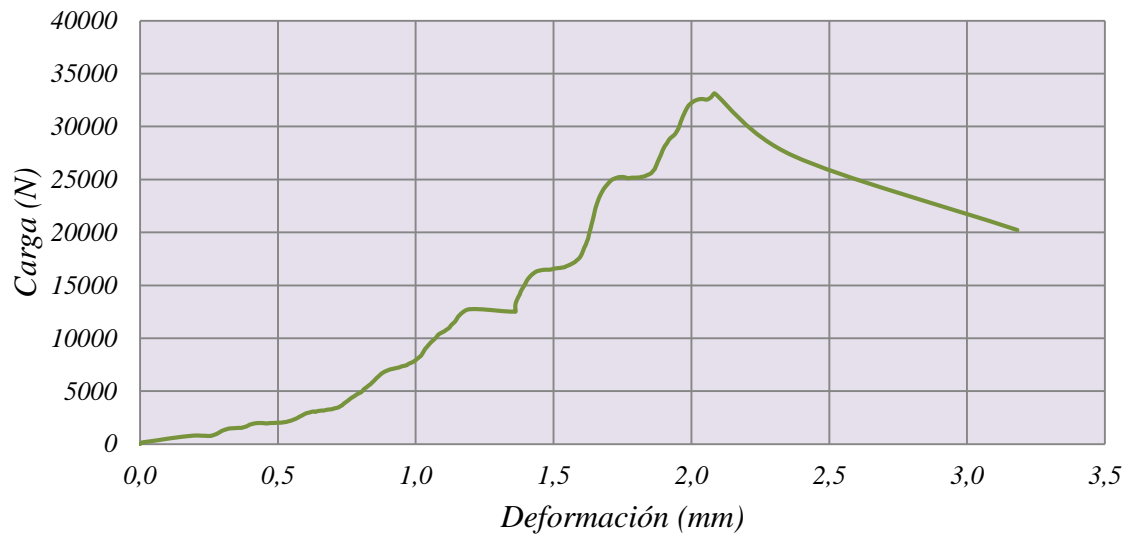
$$A = \int_0^3 3642.7x^4 - 26020x^3 + 51574x^2 - 12594x + 2365.9 dx$$

$$A = 64720.9$$

$$\text{Absorción de energía} = 64.72 J$$

Especímenes de CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>

Gráfico 63. Carga – deformación a 3mm CRFA D9-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 2653.5x^6 - 23177x^5 + 72842x^4 - 104280x^3 + 76547x^2 - 18314x + 1493.7$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

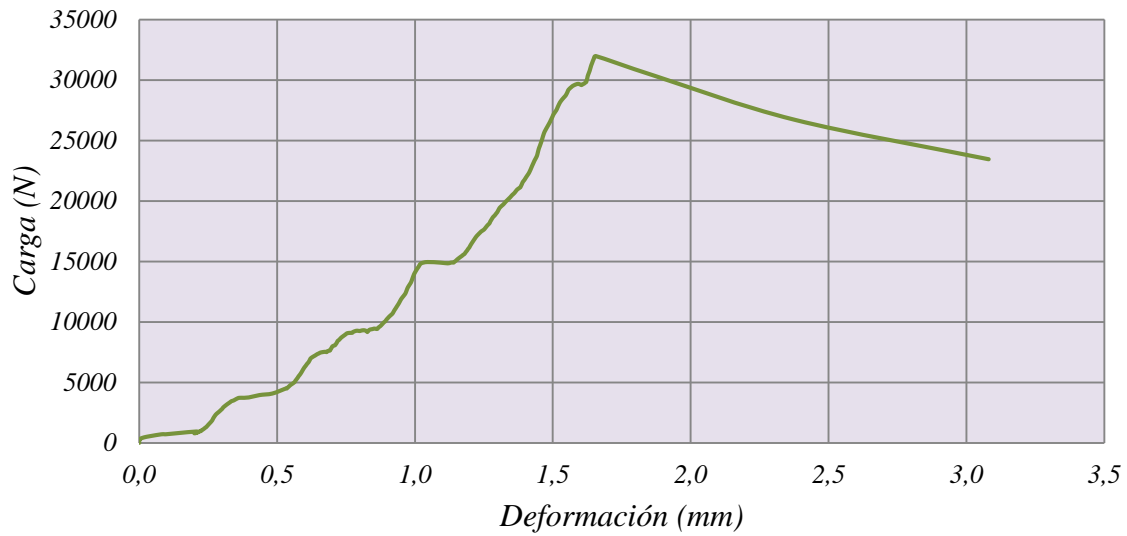
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^3 2653.5x^6 - 23177x^5 + 72842x^4 - 104280x^3 + 76547x^2 - 18314x + 1493.7 dx$$

$$A = 52466$$

$$\text{Absorción de energía} = 52.47 J$$

Gráfico 64. Carga – deformación a 3mm CRFA D9-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = 4070.1x^5 - 28957x^4 + 65031x^3 - 49349x^2 + 22483x - 682.02$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

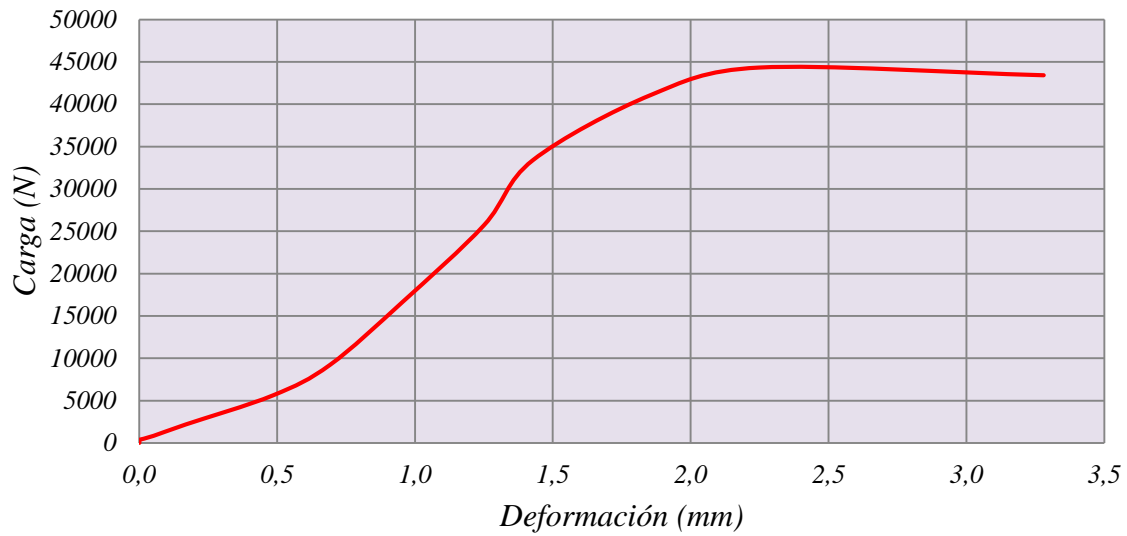
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^3 4070.1x^5 - 28957x^4 + 65031x^3 - 49349x^2 + 22483x - 682.02 \, dx$$

$$A = 59071.1$$

$$\text{Absorción de energía} = 59.07 \, J$$

Gráfico 65. Carga – deformación a 3mm CRFA D18-L1



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -2101.9x^6 + 20686x^5 - 73995x^4 + 111273x^3 - 57580x^2 + 19706x + 178.68$$

Límite Superior= 3

Límite Inferior=0

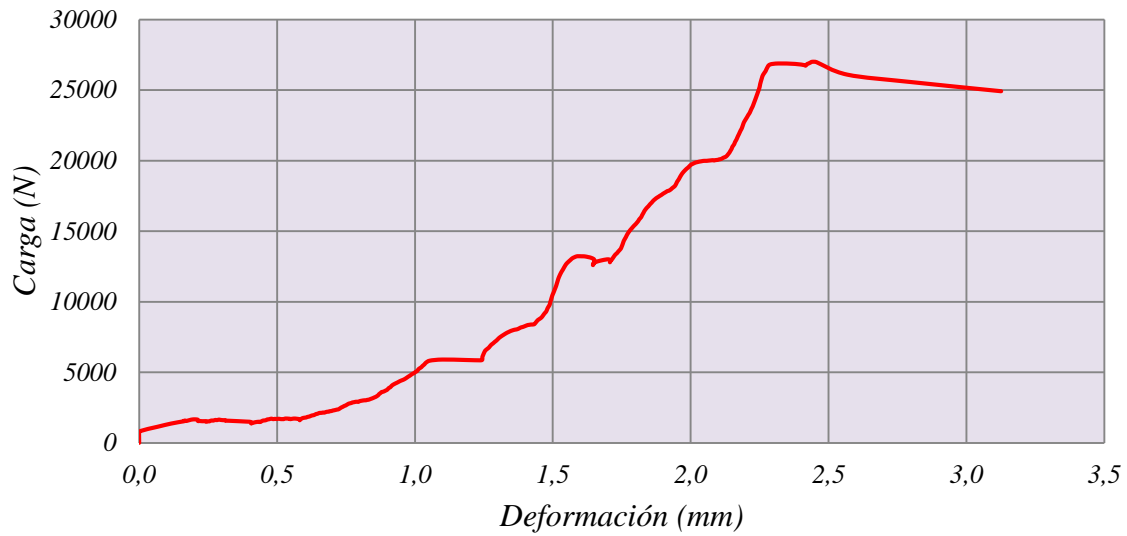
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^3 -2101.9x^6 + 20686x^5 - 73995x^4 + 111273x^3 - 57580x^2 + 19706x + 178.68 \, dx$$

$$A = 84768.7$$

$$\text{Absorción de energía} = 84.77 \, J$$

Gráfico 66. Carga – deformación a 3mm CRFA D18-L2



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Ecuación de la grafica

$$y = -2160.3x^4 + 9819.3x^3 - 8564.6x^2 + 4411.7x + 726.83$$

Límite Superior= 1

Límite Inferior=0

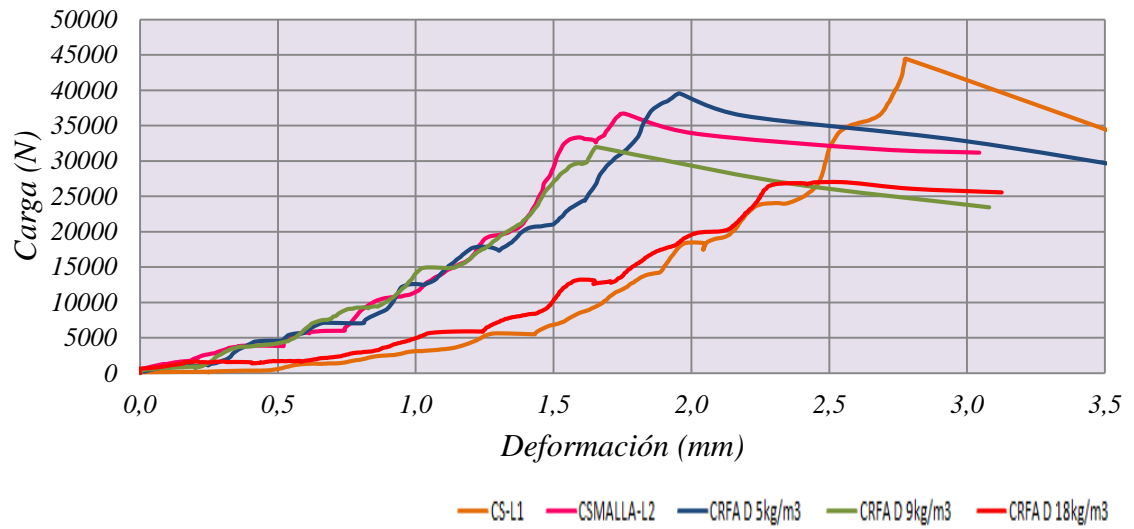
Área bajo la curva:

$$A = \int_0^1 -2160.3x^4 + 9819.3x^3 - 8564.6x^2 + 4411.7x + 726.83 \, dx$$

$$A = 38802$$

$$\text{Absorción de energía} = 38.80 \, J$$

Gráfico 67. Carga – deformación a 3mm, losas en CS, CS-MALLA vs CRFA



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

## 11 Análisis de resultados

Realizados los ensayos anteriormente descritos, se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos; teniendo en cuenta que las dosificaciones de fibra de acero empleadas fueron 5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, las cuales equivalen a fracciones de volumen de 0.06%, 0.11% y 0.23% (Carrillo & Silva Paramo, 2015, p. 4); a continuación, se presentan los siguientes análisis:

### 11.1 Asentamiento

Mide la consistencia del concreto, se refiere al grado de fluidez de una mezcla e indica qué tan seco o fluido se encuentra el concreto en estado plástico (fresco); actualmente no se conoce ningún ensayo que mida esta propiedad de manera directa, así que la evaluación se realiza por medio de una valoración visual que se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 15. Consistencia del concreto según el nivel de asentamiento

Asentamiento (cm)	Tipo de Mezcla	Concreto simple	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)		
			5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>
2.5 – 3.5	Muy seca				3.2
3.5 – 5.0	Semi seca		5.00	4.7	
5.0 – 10.0	Media				
10.0 – 15.0	Húmeda				
> 15.00	Muy húmeda	16.6			

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Mientras que el CS se clasifica como una mezcla muy húmeda, los CRFA resultan ser mezclas semi-secas y muy secas; se observa una reducción importante del 69.88% (116mm) del asentamiento entre el CS y el CRFA dosificación 5kg/m<sup>3</sup>, del 71.69% (119mm) para el CRFA

dosificación 9kg/m<sup>3</sup> y del 80.72% (134mm) para el CRFA dosificación 18kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Estos resultados indican que la presencia de fibras de acero reduce considerablemente el asentamiento, gracias al efecto de enganche que realizan las fibras de acero dentro de la mezcla de concreto. (ver gráfico 1).

## 11.2 Masa unitaria

El resultado de la masa unitaria depende de la densidad y de la cantidad de agregados contenidos en la mezcla de concreto en estado fresco.

Tabla 16. Masa unitaria concreto simple y concreto reforzado con fibras de acero

Mezcla	Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	Observaciones
CS	2211.00	Concreto de peso normal
CRFA 5kg/m <sup>3</sup>	2220.90	Concreto de peso normal
CRFA 9kg/m <sup>3</sup>	2228.82	Concreto de peso normal
CRFA 18kg/m <sup>3</sup>	2246.64	Concreto de peso normal

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

El Título C-2.2 de la NSR-10, expone varios tipos de concreto de acuerdo a sus características (liviano, de peso normal, estructural, completamente liviano, entre otros), el concreto de peso normal tiene una densidad (masa unitaria) entre 2155 y 2555 kg/m<sup>3</sup>; se observa que todos los resultados de masa unitaria de cada una de las mezclas, se encuentran dentro del rango anteriormente mencionado. La presencia de las fibras de acero con una densidad de 7869 kg/m<sup>3</sup> (Beer & Johnston, 2002) aumentan el valor de la masa unitaria de todas las muestras reforzadas con las fibras, se observa que a medida que aumentó la dosificación, se incrementó el valor de la masa unitaria un 0.45%, 0.81% y 1.63% respectivamente (ver gráfico 2).



### **11.3 Contenido de aire**

Los resultados obtenidos no registran cambios significativos del contenido de aire entre las diferentes muestras; para la de CS se obtuvo un contenido de aire del 0.56%, las muestras de CRFA dosificación 5kg/m<sup>3</sup> fue de 0.57%, dosificación 9kg/m<sup>3</sup> fue de 0.58% y para la de 18kg/m<sup>3</sup> fue 0.61%; resultando entonces una diferencia máxima de 5 puntos entre la muestra de CS y la muestra de CRFA con mayor dosificación; sin embargo, cabe anotar que la presencia de fibras aumenta los vacíos internos en la pasta de cemento, fenómeno que posiblemente se podría apreciar si la variación en la dosificación de las fibras fuese más significativa (ver gráfico 3).

### **11.4 Resistencia a la compresión**

Una vez analizados todos los cilindros se determinó que no era posible relacionar la resistencia a la compresión con el contenido de aire, ya que la variación para esta última propiedad no resultó significativa. El CS tuvo un mejor comportamiento frente a las tres muestras de CRFA en cuanto a resistencia a la compresión; la muestra de concreto simple obtuvo un resultado de 31.85 MPa, mientras que para la muestra de CRFA con dosificación de 5 kg/m<sup>3</sup> se redujo su resistencia en un 12.34% (31.85/27.92 MPa), la de 9 kg/m<sup>3</sup> bajó un 4.49% (31.85/30.42 MPa) y la muestra de dosificación 18kg/m<sup>3</sup> también disminuyó su resistencia un 8.67% (31.85/29.09 MPa). Se observó que la dosificación de 9 kg/m<sup>3</sup> obtuvo la mayor resistencia en cuanto a las muestras de CRFA.

Durante el desarrollo del ensayo se observó que, al llegar al punto de falla, las probetas de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) presentaron fisuración mas no desprendimiento de material (fig. 35); opuesto a lo que sucedió con el CS, que al llegar al punto de falla generó desprendimiento (fig. 34); la razón por la que esto ocurre, es por la distribución tridimensional de las fibras de acero a través de la matriz del concreto, impidiendo así la separación del material.



Figura 34. Cilindros CS fallados a compresión



Figura 35. Cilindro dosificación 9 kg/m3 fallado a compresión

## 11.5 Resistencia a la tensión Indirecta (compresión diametral)

Se observó que el aporte de las fibras de acero a la resistencia por tensión indirecta o compresión diametral no es significativo o representativo al realizar la comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio entre el concreto simple (CS) y el concreto reforzado con fibras de acero (CRFA); a pesar de que, si hubo un aumento en la resistencia para todas las muestras de CRFA, los valores resultantes son mínimos.

La dosificación de 5 kg/m<sup>3</sup> aumentó un 1.03% (2.92/2.95), y la de 9 kg/m<sup>3</sup> se incrementó en un 1.37%(2.92 /2.96 MPa) su resistencia a la tensión indirecta, observando un comportamiento similar entre estas dosificaciones, mientras que para la dosificación de 18 kg/m<sup>3</sup> se generó un aumento del 16.78% (2.92/3.41 MPa). se concluye entonces que las dosificaciones utilizadas no logran aumentar de manera importante la resistencia del concreto ante los esfuerzos de tensión y compresión producidos por el ensayo, por lo tanto, no amarra la matriz del concreto para restringir las deformaciones producidas.

### 11.5.1 Modulo numérico (Tensión indirecta)

Tomando como base el documento denominado “correlación de las propiedades mecánicas” publicado en 2012 por W. Carrillo, G. Gonzales y W. Aperador, en la Universidad Militar nueva granada, quienes determinaron una ecuación que relaciona la resistencia a compresión ( $f'c$ ) con la tensión indirecta ( $f't$ ):

$$f't = \left( 0.34 + 0.0052 \left( V_f * \frac{l_f}{d_f} \right) \right) \sqrt{f'c} \quad \text{Donde:}$$

$V_f$  = Fracción de volumen de fibras  $V_f = D_f / \gamma_f$

$l_f$  = longitud de la fibra.

$d_f$  = Diámetro de la fibra.

$D_f$  = Dosificación de la fibra

$\gamma_f$  = Densidad.

**CS,  $f'_c = 31.85 \text{ MPa}$**

$$f'_t = \left( 0.34 + 0.0052 \left( v_f * \frac{l_f}{d_f} \right) \right) \sqrt{f'_c}$$

$$f'_t = (0.34 + 0.0052(0)) \sqrt{31.85}$$

$$f'_t = 1.92 \text{ MPa}$$

**Características de las fibras de acero Dramix RL-45/50-BN**

*Longitud = 50mm*

*Diámetro = 1.05mm*

*Densidad = 7850kg/m<sup>3</sup>*

**CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>,  $f'_c = 27.92 \text{ MPa}$**

$$f'_t = \left( 0.34 + 0.0052 \left( v_f * \frac{l_f}{d_f} \right) \right) \sqrt{f'_c}$$

$$f'_t = \left( 0.34 + 0.0052 \left( \left( \frac{5}{7850} \right) \left( \frac{50}{1.05} \right) \right) \right) \sqrt{27.92}$$

$$f'_t = 1.80 \text{ MPa}$$

**CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>,  $f'_c = 30.42 \text{ MPa}$**

$$f'_t = \left( 0.34 + 0.0052 \left( v_f * \frac{l_f}{d_f} \right) \right) \sqrt{f'_c}$$

$$f'_t = \left( 0.34 + 0.0052 \left( \left( \frac{9}{7850} \right) \left( \frac{50}{1.05} \right) \right) \right) \sqrt{30.42}$$

$$f'_t = 1.88 \text{ MPa}$$

**CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 29.09MPa**

$$f't = \left( 0.34 + 0.0052 \left( Vf * \frac{lf}{df} \right) \right) \sqrt{f'c}$$

$$f't = \left( 0.34 + 0.0052 \left( \left( \frac{18}{7850} \right) \left( \frac{50}{1.05} \right) \right) \right) \sqrt{29.09}$$

$$f't = 1.84MPa$$

Aplicando la ecuación propuesta por Wafa y Ashour en 1992 y citada por W. Carrillo, D. Acosta y A. Barrera, en el documento Desempeño comprensión diametral de 2013.

$$f't = 0.58\sqrt{f'c} + 3.02Vf$$

**CS, f'c= 31.85 MPa**

$$f't = 0.58\sqrt{f'c} + 3.02Vf$$

$$f't = 0.58\sqrt{31.85} + 3.02(0)$$

$$f't = 3.27MPa$$

**CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 27.92 MPa**

$$f't = 0.58\sqrt{f'c} + 3.02Vf$$

$$f't = 0.58\sqrt{27.92} + 3.02 \left( \frac{5}{7850} \right)$$

$$f't = 3.07MPa$$

**CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 30.42 MPa**

$$f't = 0.58\sqrt{f'c} + 3.02Vf$$

$$f't = 0.58\sqrt{30.42} + 3.02\left(\frac{9}{7850}\right)$$

$$f't = 3.20MPa$$

**CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 29.09MPa**

$$f't = 0.58\sqrt{f'c} + 3.02Vf$$

$$f't = 0.58\sqrt{29.09} + 3.02\left(\frac{18}{7850}\right)$$

$$f't = 3.14MPa$$

Aplicando las ecuaciones propuestas por Eren y Celik en 1997 y citada por W. Carrillo, D. Acosta y A. Barrera, en el documento Desempeño comprensión diametral de 2013.

$$f't = 1.04\sqrt{f'c} + 1.50 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$f't = 1.08Vf + 3.82 \quad \text{Ecuación (2)}$$

**CS, f'c= 31.85 MPa**

$$f't = 1.04\sqrt{f'c} + 1.50$$

$$f't = 1.04\sqrt{31.85} + 1.50$$

$$f't = 7.37MPa$$

$$f't = 1.08Vf + 3.82$$

$$f't = 1.08(0) + 3.82$$

$$f't = 3.82MPa$$

**CRFA dosificación 5 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 27.92 MPa**

$$f't = 1.04\sqrt{f'c} + 1.50$$

$$f't = 1.04\sqrt{27.92} + 1.50$$

$$f't = 7.00 \text{ MPa}$$

$$f't = 1.08Vf + 3.82$$

$$f't = 1.08\left(\frac{5}{7850}\right) + 3.82$$

$$f't = 3.82069 \text{ MPa}$$

**CRFA dosificación 9 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 30.42 MPa**

$$f't = 1.04\sqrt{f'c} + 1.50$$

$$f't = 1.04\sqrt{30.42} + 1.50$$

$$f't = 7.24 \text{ MPa}$$

$$f't = 1.08Vf + 3.82$$

$$f't = 1.08\left(\frac{9}{7850}\right) + 3.82$$

$$f't = 3.82124 \text{ MPa}$$

**CRFA dosificación 18 kg/m<sup>3</sup>, f'c= 29.09 MPa**

$$f't = 1.04\sqrt{f'c} + 1.50$$

$$f't = 1.04\sqrt{29.09} + 1.50$$

$$f't = 7.11 \text{ MPa}$$

$$f't = 1.08Vf + 3.82$$

$$f't = 1.08\left(\frac{18}{7850}\right) + 3.82$$

$$f't = 3.82248 \text{ MPa}$$

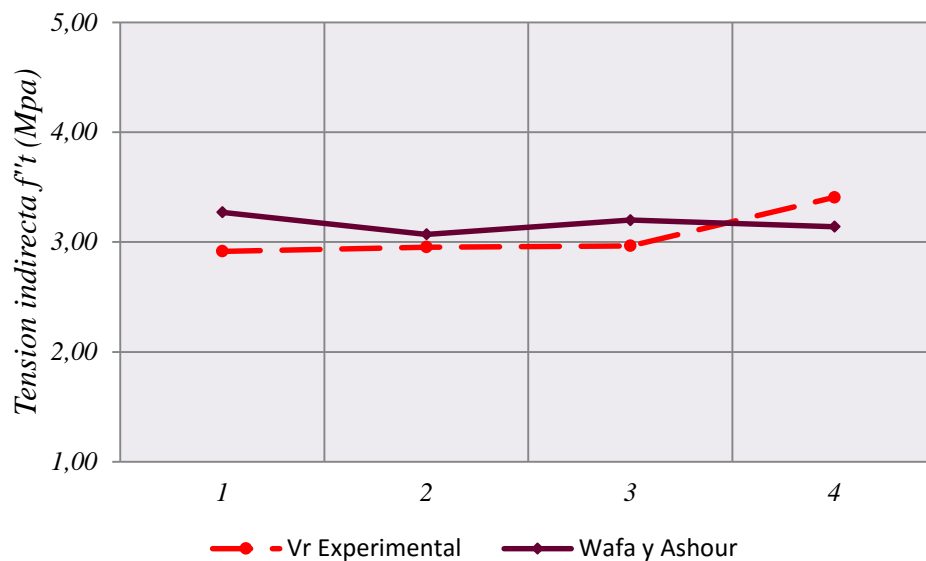
Tabla 17. Comparación de valores de Tensión indirecta ( $f't$ )

Elementos	f'c (MPa)	Tensión indirecta $f't$ (MPa)				
		Valor Experimental	W. Carrillo G. Gonzales	Wafa y Ashour	Eren y Celik (1)	Eren y Celik (2)
CS	31.85	2.92	1.92	3.27	7.37	3.82
CRFA 5kg/m <sup>3</sup>	27.92	2.95	1.80	3.07	7.00	3.82069
CRFA 9kg/m <sup>3</sup>	30.42	2.96	1.88	3.20	7.24	3.82124
CRFA 18kg/m <sup>3</sup>	29.09	3.41	1.84	3.14	7.11	3.82248

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Una vez aplicados los modelos matemáticos para determinar la tensión indirecta ( $f^t$ ), se descartan los modelos de W. Carrillo y G. Gonzales por estar un 40% por debajo de los valores experimentales; el modelo (1) de Eren y Celik duplica los resultados experimentales y el (2) tampoco determina un valor convincente, porque sus resultados son iguales; el modelo de Wafa y Ashour fue el que se acercó más a los resultados experimentales, sin embargo no sigue un comportamiento ascendente tal como sucede con los valores experimentales:

Gráfico 68. Tensión indirecta, Valor experimental VS Wafa y Ashour



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

### 11.6 Resistencia a flexión (Modulo de rotura - flexión de vigas en tercios medios)

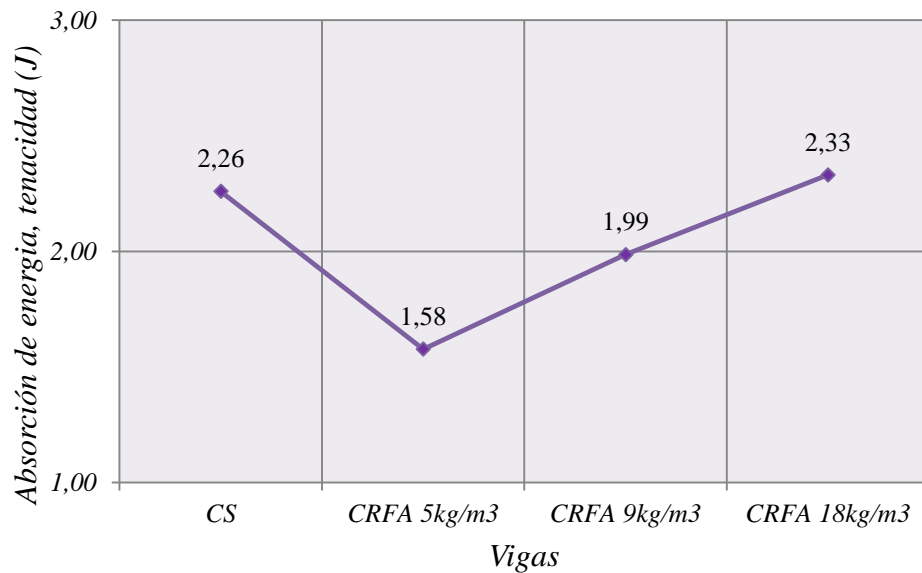
El aporte de las fibras de acero a la resistencia a flexión es significativo, al comparar los resultados obtenidos en laboratorio se determinó que para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> se obtuvo un incremento de 10.72% (3.73/4.13 MPa), la de 9kg/m<sup>3</sup> un aumento de 7.77% (3.73/4.02 MPa) y para la de 18kg/m<sup>3</sup> fue de 9.11% (3.73/4.07 MPa); el valor de módulo de rotura para todas las muestras de CRFA fue superior al de las muestras de CS, se observó que a medida que aumentó



la dosificación de fibras de acero disminuyó su resistencia, excepto entre las dosificaciones de 9kg/m<sup>3</sup> y 18kg/m<sup>3</sup>. Este aumento en la resistencia a la flexión (módulo de rotura), obedece al aporte de las fibras ante esfuerzos de tensión, ya que la matriz del concreto presenta un comportamiento frágil y las fibras generan un refuerzo tridimensional que la cose y trasmite los esfuerzos entre fisuras (efecto de puenteo), lo que mejora su comportamiento.

No hubo incremento en la capacidad de absorción de energía (tenacidad), la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> disminuyo un 30% (2.26/1.58J), la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> disminuyo un 11.94% (2.26/1.99J) y la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> evidencio un pequeño aumento de 3.09% (2.26/2.33J).

Gráfico 69. Absorción de energía o Tenacidad en Vigas



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

### 11.6.1 Modulo numérico (Flexión en vigas)

La relación del módulo de rotura con la resistencia a compresión se expresa en la ecuación (22) según el capítulo 2 de Estructuras de concreto reforzado (Park & Paulay, 1978) pág. 18.

$$f' r = k \sqrt{f' c}$$

Donde k varía de 2,0 a 2,7 y  $f' c$  se expresa en  $\text{kg/cm}^2$

CS,  $f' c = 31.85 \text{ MPa}$

$$f' r = k \sqrt{f' c}$$

$$f' r = 2 \sqrt{324.87}$$

$$f' r = 36.05 \text{ kg / cm}^2 \rightarrow 3.53 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $5 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 27.92 \text{ MPa}$

$$f' r = k \sqrt{f' c}$$

$$f' r = 2 \sqrt{284.80}$$

$$f' r = 33.75 \text{ kg / cm}^2 \rightarrow 3.31 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $9 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 30.42 \text{ MPa}$

$$f' r = k \sqrt{f' c}$$

$$f' r = 2 \sqrt{310.27}$$

$$f' r = 35.23 \text{ kg / cm}^2 \rightarrow 3.45 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 29.09 \text{ MPa}$

$$f' r = k \sqrt{f' c}$$

$$f' r = 2 \sqrt{296.67}$$

$$f' r = 34.45 \text{ kg / cm}^2 \rightarrow 3.38 \text{ MPa}$$

La relación del módulo de rotura y la resistencia a tensión indirecta se expresa en la siguiente ecuación:

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(f'_{t})$$

Donde  $f'_{t}$  se expresa en  $\text{kg/cm}^2$ .

CS,  $f'_{t} = 3.29 \text{ MPa}$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(f'_{t})$$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(33.60)$$

$$f'_{r} = 45.27 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 4.44 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $5 \text{ kg/m}^3$ ,  $f'_{t} = 2.95 \text{ MPa}$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(f'_{t})$$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(30.12)$$

$$f'_{r} = 42.14 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 4.13 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $9 \text{ kg/m}^3$ ,  $f'_{t} = 2.96 \text{ MPa}$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(f'_{t})$$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(30.24)$$

$$f'_{r} = 42.24 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 4.14 \text{ MPa}$$

CRFA dosificación  $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $f'_{t} = 3.41 \text{ MPa}$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(f'_{t})$$

$$f'_{r} = 15.03 + 0.90(34.74)$$

$$f'_{r} = 46.29 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 4.54 \text{ MPa}$$

El documento “Correlaciones de las propiedades mecánicas” publicado por W. Carrillo y G. Gonzales, de la Universidad Militar Nueva Granada, se propone la siguiente ecuación para determinar el módulo de rotura a partir de la resistencia a compresión:

$$f' r = 0.72\sqrt{f' c} \quad \text{Ecuación (24)}$$

CS,  $f' c = 31.85 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} f' r &= 0.72\sqrt{f' c} \\ f' r &= 0.72\sqrt{31.85} \\ f' r &= 4.06 \text{ MPa} \end{aligned}$$

CRFA dosificación  $5 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 27.92 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} f' r &= 0.72\sqrt{f' c} \\ f' r &= 0.72\sqrt{27.92} \\ f' r &= 3.80 \text{ MPa} \end{aligned}$$

CRFA dosificación  $9 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 30.42 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} f' r &= 0.72\sqrt{f' c} \\ f' r &= 0.72\sqrt{30.42} \\ f' r &= 3.97 \text{ MPa} \end{aligned}$$

CRFA dosificación  $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $f' c = 29.09 \text{ MPa}$

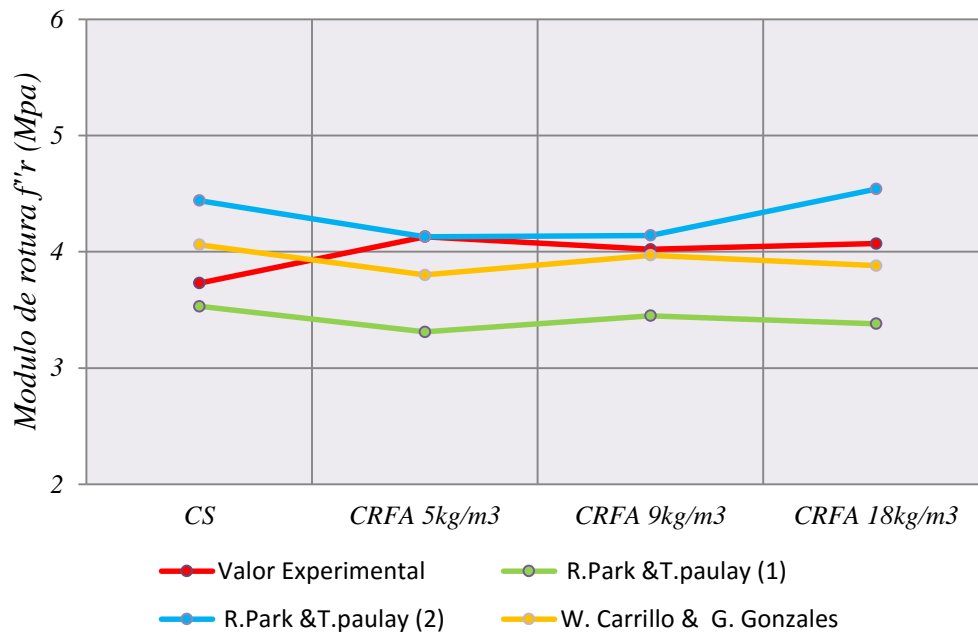
$$\begin{aligned} f' r &= 0.72\sqrt{f' c} \\ f' r &= 0.72\sqrt{29.09} \\ f' r &= 3.88 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tabla 18. Comparación de valores de Modulo de rotura ( $f'r$ )

Elementos	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	Módulo de Rotura $f'r$ (MPa)			
			Valor Experimental	R. Park T. paulay (1) (MPa)	R. Park T. paulay (2) (MPa)	W. Carrillo G. Gonzales
CS	31.85	3.29	3.73	3.53	4.44	4.06
CRFA 5kg/m <sup>3</sup>	27.92	2.95	4.13	3.31	4.13	3.80
CRFA 9kg/m <sup>3</sup>	30.42	2.96	4.02	3.45	4.14	3.97
CRFA 18kg/m <sup>3</sup>	29.09	3.41	4.07	3.38	4.54	3.88

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 70. Comparación de valores de Modulo de rotura ( $f'r$ )



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Los modelos numéricos aplicados a la resistencia a compresión para determinar el módulo de rotura generaron un comportamiento similar entre ellos, tal como se observa en el gráfico, sin embargo, ninguno tuvo un comportamiento semejante en todos sus valores, la ecuación (2) de park-paulay es la que genera un comportamiento óptimo exceptuando al concreto simple, mientras que la ecuación (1) de Park-Paulay es la que predice el valor del concreto simple.

### **11.7 Absorción de Energía, tenacidad del concreto**

De acuerdo con las pruebas realizadas a las diferentes losas se observa que las fibras de acero no superan a la malla electro soldada si se usan como refuerzo principal; los resultados muestran que los valores de flexión para las losas de concreto simple, están 77.90% (12.58/2.78mm) por debajo de los valores de flexión (grafico 46) de las losas reforzadas con malla electrosoldada; en el caso de las losas reforzadas con fibras de acero, las dosificaciones de 5 y 9 kg/m<sup>3</sup>, arrojaron resultados de reducción de flexión del 86.72%(12.58/1.67mm) y 85.06% (12.58/1.88mm), incluso inferiores a los de las losas de CS; solo la para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>, se redujo notoriamente la diferencia entre las losas de CS con malla electrosoldada y las losas de CRFA, sin embargo sigue estando por debajo un 45.07% (12.58/6.91mm).

En cuanto a la resistencia a la carga (grafico 47), las losas de CS están un 4.91% (44.50/46.80MPa) por debajo de las losas de CS reforzadas con malla electrosoldada, y con respecto a las losas de CRFA dosificación de 5, 9 y 18kg/m<sup>3</sup>, se observa una reducción de 23.93% (35.60/46.80MPa), 30.44% (32.55/46.80MPa) y 12.18% (41.10/46.80MPa) respectivamente.

Atendiendo al mismo comportamiento de las variables anteriores, el valor de la tenacidad (grafico 48) o capacidad de absorción de energía, con respecto a las losas de CS reforzadas con malla electrosoldada arrojó los siguientes resultados: en el caso de las losas de CS se observó una

reducción de su tenacidad de 81.44% (849.26/157.63J), las losas de CRFA tampoco superaron el valor de tenacidad de la losa de CS con malla electrosoldada, quedando para las tres dosificaciones (5, 9 y 18kg/m<sup>3</sup>) sobre los 56.95% (849.26/365.60J), 45.07% (849.26/466.50J) y 19.77% (849.26/681.36J) respectivamente.

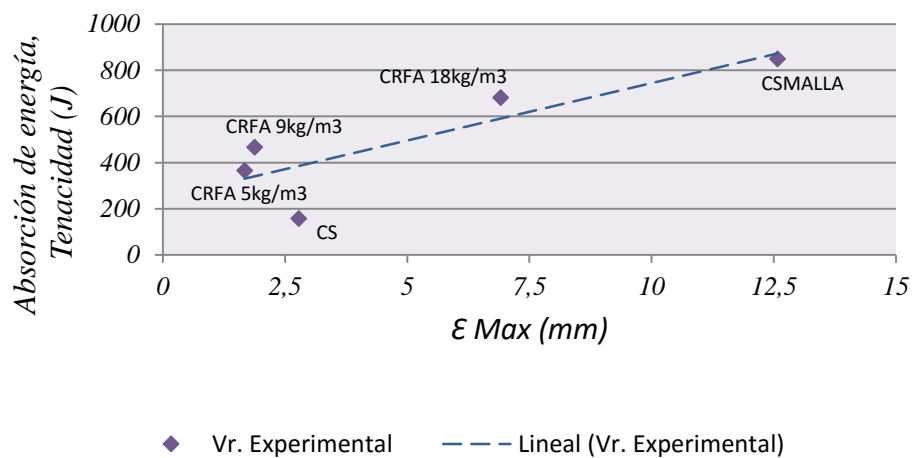
Se realizó además el análisis del comportamiento de las losas cuando alcanzaron 1 y 3 mm de deformación respectivamente, los resultados fueron proporcionalmente similares a los expuestos arriba, en todos los casos se observa que la tenacidad de las losas es proporcional a la deformación.

Tabla 19. Flexión en losas - deflexión, carga y tenacidad

Muestra	$\epsilon$ Max.	Resistencia (MPa)	Tenacidad (J)
CS	2.78	44.5	157.63
CSMALLA	12.57	46.8	849.26
CRFA 5kg/m <sup>3</sup>	1.67	35.6	365.60
CRFA 9kg/m <sup>3</sup>	1.87	32.55	466.50
CRFA 18kg/m <sup>3</sup>	6.91	41.1	681.36

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 71. Flexión en losas –  $\epsilon$  Max. vs Tenacidad



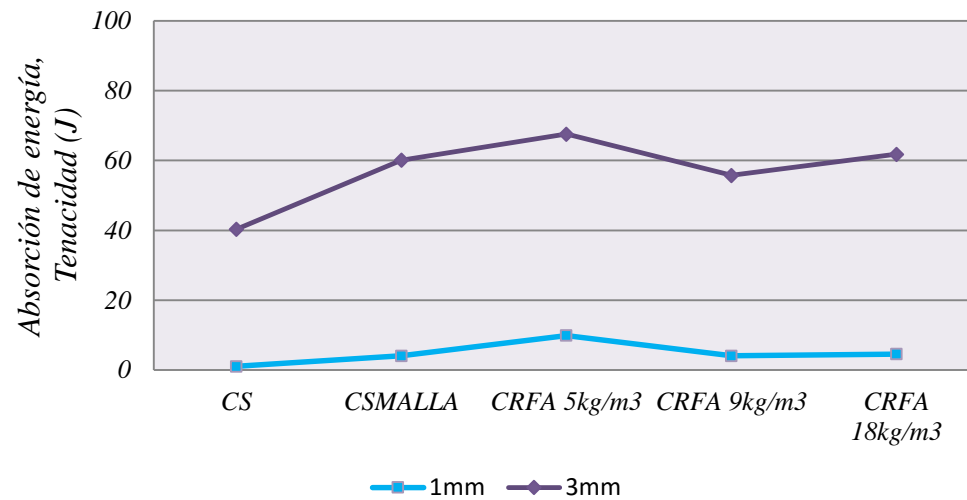
Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Tabla 20. Flexión en losas - Comportamiento de losas a 1mm y 3mm

Muestra $\epsilon$ (mm)	Tenacidad (J)	
	1	3
CS	1.00	40.28
CSMALLA	4.04	60.12
CRFA 5kg/m <sup>3</sup>	9.86	67.57
CRFA 9kg/m <sup>3</sup>	4.05	55.77
CRFA 18kg/m <sup>3</sup>	61.785	4.565

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales

Gráfico 72. Flexión en losas - Comportamiento de losas a 1mm y 3mm



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales



## 12 Comparación con estudio de concreto reforzado con fibras de polipropileno

En este capítulo presenta una comparación de los resultados obtenidos en la presente investigación y los resultados de un estudio realizado bajo las mismas condiciones, utilizando la misma mezcla de concreto simple pero reforzando las muestras concreto con fibras de polipropileno, la investigación se titula "Aplicación de concreto reforzado con fibras sintéticas en losas de contrapiso para viviendas de interés social" elaborado por el Ing. Felipe Melo, con el objetivo de evaluar el desempeño de losas de contrapiso de 0,1 m de espesor, fabricadas con concreto reforzado con fibras sintéticas de polietileno/polipropileno (CRFS) TUF STRAND SF en tres dosificaciones 1, 2 y 3 kg/m<sup>3</sup>. Las siguientes tablas resumen y comparan los resultados:

### 12.1 Asentamiento

Tabla 21. Nivel de asentamiento CRFA vs CRFS

Asentamiento (cm)	Tipo de Mezcla	Resultados del presente estudio			Resultados del estudio con Fibras Sintéticas				
		CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
			5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>		1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
2.5 – 3.5	Muy seca			3.2			2.5		
3.5 – 5.0	Semi seca	5.00	4.7		4.6	4.5			
5.0 – 10.0	Media								
10.0 – 15.0	Húmeda								
> 15.00	Muy húmeda	16.6			16.65				

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

Se observa que los resultados de nivel de asentamiento son bastante similares; esto indica que tanto las fibras de acero como las sintéticas, realizan el efecto de enganche dentro de una mezcla de concreto.

## 12.2 Masa Unitaria

Tabla 22. Masa unitaria CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio				Resultados del estudio con Fibras Sintéticas			
	CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>		1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	2211	2220.9	2228.82	2246.64	2364.3	2335.70	2342.90	2350.10

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

Todos los resultados de masa unitaria se clasifican como concreto de peso normal, los valores de las muestras de CRFS están alrededor de un 7% por encima de las muestras de CRFA; esto no significa que las fibras sintéticas aumenten en mayor grado el valor de la masa unitaria; sería necesario revisar primero la diferencia entre las muestras de CS de las dos investigaciones.

## 12.3 Contenido de aire

Tabla 23. Contenido de aire CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio				Resultados del estudio con Fibras Sintéticas			
	CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>		1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de aire (%)	0.56	0.57	0.58	0.61	1.7	1.8	2.1	2.3

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

En los dos casos se evidencia que la presencia de fibras aumenta los vacíos internos en la pasta de cemento, sin embargo, el contenido de aire para las muestras de CRFS es casi cuatro veces superior a las muestras de CRFA, y esta misma diferencia se presenta en los resultados de CS; esto hace que los resultados sean un poco inconsistentes.

## 12.4 Resistencia a la compresión

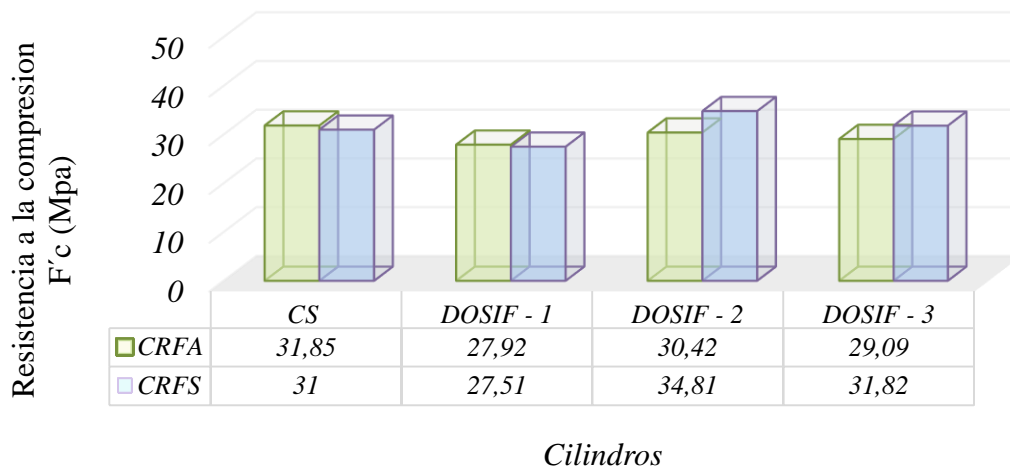
Tabla 24. Resistencia a la compresión CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio			Resultados del estudio con Fibras Sintéticas				
	CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)		CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)			
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>		18 kg/m <sup>3</sup>	1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
F <sub>c</sub> (MPa)	31.85	27.92	30.42	29.09	31.00	27.51	34.81	31.82

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

Los valores de resistencia a la compresión se comportan de forma similar para los dos estudios, a medida que se aumenta la dosificación mejora su resistencia, excepto para el mayor valor de dosificación en los dos casos (18 kg/m<sup>3</sup> y 3 kg/m<sup>3</sup>) respectivamente.

Gráfico 73. Resistencia a la compresión CRFA vs CRFS



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

## 12.5 Resistencia a la tensión Indirecta (compresión diametral)

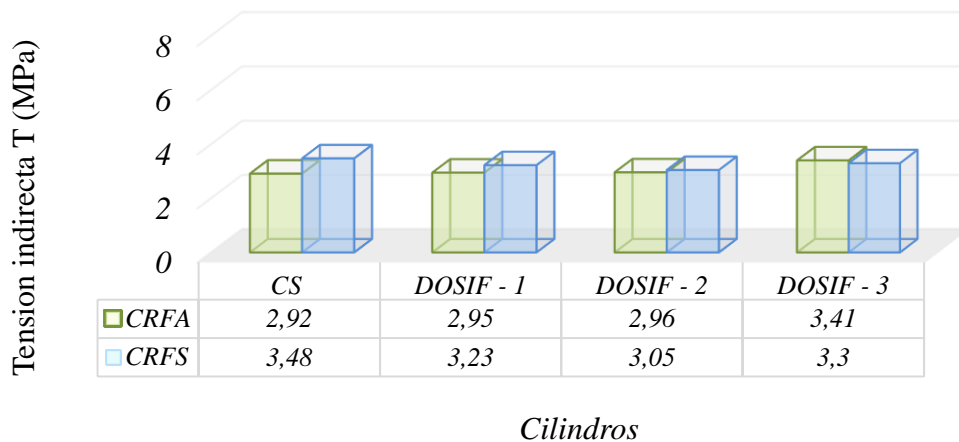
Tabla 25. Resistencia a la tensión indirecta CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio				Resultados del estudio con Fibras Sintéticas			
	CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>		1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
Tensión Indirecta (MPa)	3.29	2.95	2.96	3.41	3.48	3.23	3.05	3.30

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

La comparación de resultados muestra que tanto para las muestras de CRFA y las de CRFA aumentan su resistencia a la tensión indirecta a medida que se aumenta la dosificación; todos los valores de las muestras del estudio de fibras de polipropileno están por encima un 6% aproximadamente.

Gráfico 74. Resistencia a la tensión indirecta CRFA vs CRFS



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

## 12.6 Resistencia a flexión (Modulo de rotura - flexión de vigas en tercios medios)

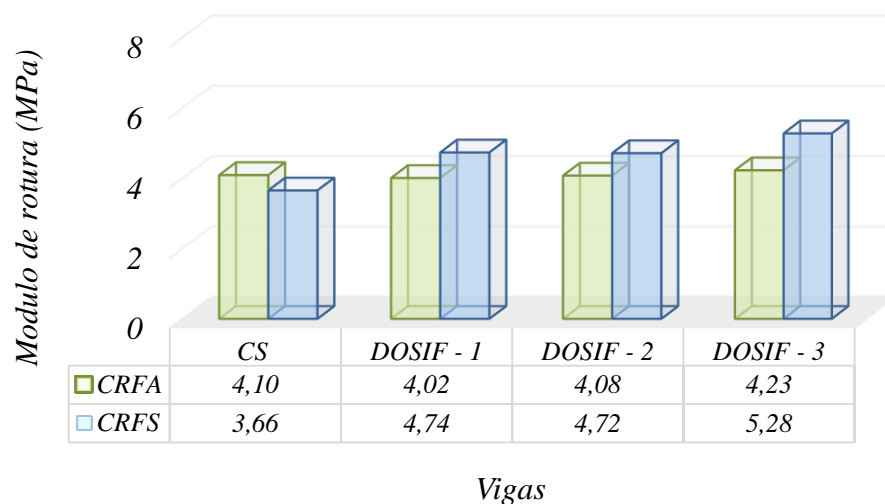
Tabla 26. Resistencia a flexión (módulo de rotura) CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio				Resultados del estudio con Fibras Sintéticas			
	CS	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
		5 kg/m <sup>3</sup>	9 kg/m <sup>3</sup>	18 kg/m <sup>3</sup>		1 kg/m <sup>3</sup>	2 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de rotura (MPa)	4.10	4.02	4.08	4.23	3.66	4.74	4.72	5.28

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

El módulo de rotura para los dos casos muestra un comportamiento ascendente a medida que se aumenta la dosificación; sin embargo, los valores alcanzados por las muestras de CRFS muestran un mayor aumento, cerca del 25% para todos los casos de dosificación.

Gráfico 75. Resistencia a flexión (módulo de rotura) CRFA vs CRFS



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

## 12.7 Absorción de energía, tenacidad del concreto

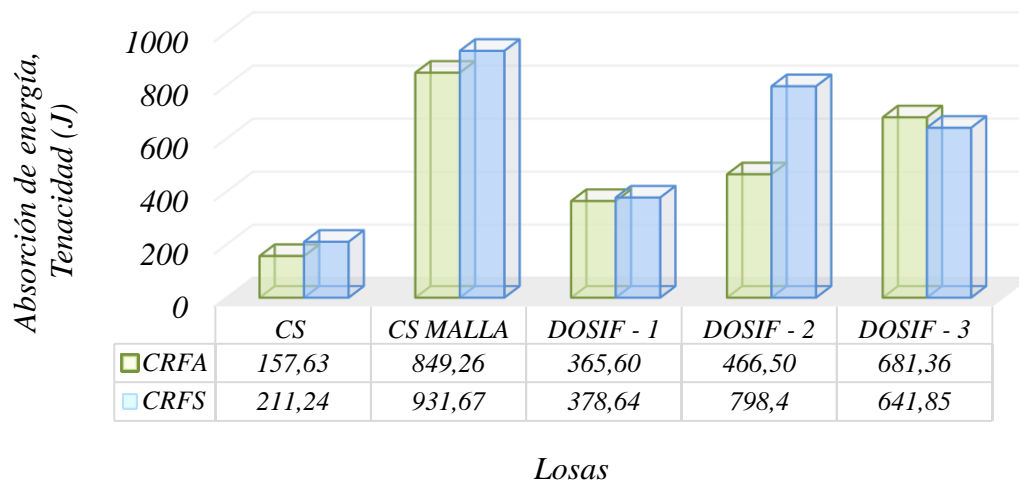
Tabla 27. Absorción de energía (Tenacidad) CRFA vs CRFS

	Resultados del presente estudio					Resultados del estudio con Fibras Sintéticas				
	CS	CS MALLA	Concreto reforzado con fibras de acero (dosificación)			CS	CS MALLA	Concreto reforzado con fibras de polipropileno (dosificación)		
			5	9	18			1	2	3
			kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>			kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Tenacidad (J)	157.63	849.26	365.60	466.50	681.36	211.24	931.67	378.64	798.4	641.85

Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

Los valores de tenacidad muestran en ambos estudios que la malla electrosoldada tiene mejor comportamiento en comparación con los dos tipos de fibras, sería necesario modificar las dosificaciones en las muestras de CRFA y CRFS para mejorar el comportamiento de las mismas.

Gráfico 76. Absorción de energía (Tenacidad) CRFA vs CRFS



Fuente. Elaboración propia a partir de datos experimentales y de consulta

### 13 Análisis económico

El análisis económico es un factor determinante en todo proyecto de ingeniería, ya que la decisión de realización o no de un determinado proyecto, depende del análisis de costos que se realice del mismo; es por ello que muchos investigadores están en la búsqueda constante de materiales que brinden excelentes condiciones de calidad y resistencia, y que sus precios sean competitivos con respecto a los materiales usados convencionalmente.

El análisis de costo que se presenta a continuación, se basó en precios locales de la ciudad de Bogotá para el año en curso (2017); se realizó el análisis para una placa de contrapiso de 3 x 12 m (36 m<sup>2</sup>) y un espesor de 0.10m; se presentan los costos que tendría la construcción de dicha losa con el método convencional (concreto + malla electrosoldada) y utilizando las fibras de acero:

**Análisis 1.** Construcción de la losa por método convencional, características generales:

- Tamaño de losa = 3m x 12m e=0.10m (36 m<sup>2</sup>, 3.6m<sup>3</sup>)
- Malla electro-soldada Codiacerro M-188, medidas (6m x 2.35m), peso 42.18 kg.
- Traslapo malla electrosoldada= 0.30 m (Se requieren 3 mallas para cubrir el área)

Tabla 28. Análisis de costo losa método convencional (malla electrosoldada)

Descripción	Un	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Concreto pre mezclado 21 Mpa (Según especificación de tabla No. 3)	m <sup>3</sup>	3.78	\$ 430,000	\$ 1,625,400
Malla electro soldada Ref. M-188	kg	126.54	\$ 2,700	\$ 341,658
Pala	Un	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Mano de obra ( ver detalle)	Día	0.47	\$ 465,500	\$ 218,785
<b>Total</b>				<b>\$ 2,275,843</b>

Notas: Desperdicio considerado para el concreto 5%

Fuente. Elaboración propia a partir de datos suministrados por Geoestructuras Ltda.

Tabla 29. Mano de obra losa método convencional (malla electrosoldada)

Personal	Valor Día	Prestaciones sociales	Valor por persona	Cant	Valor total
Maestro	\$ 60,000	\$ 54,000	\$ 114,000	1	\$ 114,000
Oficial	\$ 45,000	\$ 40,500	\$ 85,500	1	\$ 85,500
Ayudante	\$ 35,000	\$ 31,500	\$ 66,500	4	\$ 266,000
<b>Total</b>					<b>\$ 465,500</b>

Nota: cuadrilla con un rendimiento de 8m<sup>3</sup> por día

Fuente. Elaboración propia a partir de datos suministrados por Geoestructuras Ltda.

**Análisis 2.** Construcción de la losa reemplazando la malla electrosoldada por fibras de acero, características generales:

- Tamaño de losa = 3m x 12m e=0.10m (36 m<sup>2</sup>, 3.6m<sup>3</sup>)
- Fibras de acero Dramix RL-45/50-BN
- Dosificación recomendada por el fabricante = 20kg/m<sup>3</sup> (se requieren 4 bolsas de 20kg c/u)

Tabla 30. Análisis de costo losa usando fibras de acero

Descripción	Un	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Concreto pre mezclado 21 MPa (Según especificación de tabla No. 3)	m <sup>3</sup>	3.78	\$ 430,000	\$ 1,625,400
Fibras de acero Dramix RL-45/50-BN	kg	80	\$ 2,300	\$ 184,000
Pala	Un	3	\$ 30,000	\$ 90,000
Mano de obra ( ver detalle)	Día	0.24	\$ 266,000	\$ 63,840
<b>Total</b>				<b>\$ 1,963,240</b>

Notas: Desperdicio considerado para el concreto 5%

Fuente. Elaboración propia a partir de datos suministrados por Geoestructuras Ltda.



Tabla 31. Mano de obra losa usando fibras de acero

Personal	Valor Día	Prestaciones sociales	Valor por persona	Cant	Valor total
Maestro	\$ 60,000	\$ 54,000	\$ 114,000	1	\$ 114,000
Oficial	\$ 45,000	\$ 40,500	\$ 85,500	1	\$ 85,500
Ayudante	\$ 35,000	\$ 31,500	\$ 66,500	1	\$ 66,500
<b>Total</b>					<b>\$ 266,000</b>

Nota: cuadrilla con un rendimiento de 16m<sup>3</sup> por día

Fuente. Elaboración propia a partir de datos suministrados por Geoestructuras Ltda.

El análisis de la comparación de costos de la construcción de la losa con malla electrosoldada y su reemplazo por fibras de acero, muestra una reducción del 16% (\$2,275,843/\$1,963,240) en el costo total utilizando fibras de acero, cabe destacar que la mayor reducción de costos se observa en el ítem de mano de obra, ya que se requiere menos personal cuando se utilizan fibras de acero; adicionalmente es importante tener en cuenta que el tiempo de ejecución de labores también se reduce en un 95%, es decir, que en grandes obras este ahorro impactaría positivamente el presupuesto y cronograma de ejecución.

## 14 Conclusiones

- El aporte de las fibras de acero no mejora las condiciones iniciales del concreto simple, la presencia de las fibras redujo las propiedades físicas del concreto como se evidencio en el aumento del contenido de aire en 1.75% (0.56/0.57) para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup>, en 3.44% (0.56/0.58) para la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> y en 8.20% (0.56/0.61) para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>; se observó que el contenido de aire aumentó con el incremento del volumen de fibras de acero agregadas a la mezcla; el aire es introducido al momento del mezclado de las fibras con el concreto. El valor de la masa unitaria del concreto reforzado con fibras de acero permaneció casi constante a medida que se aumentó el volumen de la dosificación, aumento levemente con la aplicación de cada dosificación, para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup>, aumento en 0.44% (2211/2220.90), para la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> aumento en 0.80% (2211/2228.82) y para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> aumento en 1.60% (2211/2246.64).
- En resistencia a compresión, se evidencio que la presencia de fibras de acero no aumento la resistencia del concreto, al contrario, mostró pequeñas disminuciones en las diferentes dosificaciones; por tal motivo el aporte de las fibras de acero es nulo o despreciable; como se evidencio en las dosificaciones de 5kg/m<sup>3</sup> (27.92MPa), 9 kg/m<sup>3</sup> (30.92MPa) y 18kg/m<sup>3</sup>(29.09MPa), que se mantuvieron por debajo del concreto simple (31.85 MPa); este resultado se debe a que la presencia de fibras de acero en la mezcla aumentan el contenido de aire atrapado que se genera en el proceso de adición de las mismas, y este volumen ocupado por el aire atrapado y las fibras de acero reemplazan la pasta de cemento, y por ello se produce la reducción en la resistencia. Sin embargo, es importante destacar que en el proceso se observó que, al llegar al punto de falla, el concreto reforzado con fibras de acero presentó fisuración mas no desprendimiento de material, opuesto a lo que sucedió con el concreto simple, el cual, al llegar al punto de falla generó desprendimiento, esto ocurre porque la distribución tridimensional de la fibra de acero a través de la matriz del concreto impide la separación del material.

- La resistencia a compresión diametral o tensión indirecta no se ve incrementada significativamente por la presencia de las fibras de acero en ninguna de las tres dosificaciones aplicadas (5kg/m<sup>3</sup>, 9 kg/m<sup>3</sup> y 18 kg/m<sup>3</sup>), el concreto simple genero una compresión diametral de (2.92 MPa), las dos primeras dosificaciones estuvieron por encima solo un 1.03% y 1.37% respectivamente, y la tercera fue la que mostro un mayor aumento con un 16.78%; sin embargo los resultados no son concluyentes, lo que supone que probablemente las dosificaciones utilizadas no logran aumentar de manera importante la resistencia del concreto ante los esfuerzos de tensión y compresión producidos por el ensayo, por lo tanto, no amarra la matriz del concreto para restringir las deformaciones producidas.
- En módulo de rotura o resistencia a la flexión, todas las muestras reforzadas con fibras de acero en sus diferentes dosificaciones superaron a las muestras de concreto simple, esto se debe al aporte de las fibras ante esfuerzos de tensión, ya que la matriz del concreto presenta un comportamiento frágil y las fibras generan un refuerzo tridimensional que cose la matriz y trasmite esfuerzos entre fisuras (efecto de puenteo), generando un mejor comportamiento ante dichos esfuerzos; el concreto simple genero un módulo de rotura de (3.73MPa) aumentando su módulo de rotura para 5 kg/m<sup>3</sup> en 10.72% (3.73/4.13MPa), para la dosificación 9 kg/m<sup>3</sup> aumento un 7.77% (3.73/4.02MPa) y finalmente al adicionar 18kg/m<sup>3</sup> aumento el módulo de rotura en 9.11% (3.73/4.07MPa). No se observó el mismo incremento en la capacidad de absorción de energía o tenacidad, la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> genero una disminución del 30% (2.26/1.58 J) la segunda dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> disminuyo un 11.94% (2.26/1.99 J), mientras que la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> si evidencio un pequeño aumento de 3.09% (2.26/2.33 J).
- En los ensayos que se llevaron a punto de falla se observó que, en el momento de la rotura de las probetas, los elementos de concreto simple presentaron desprendimiento de material o división de los mismos, mientras que los elementos reforzados con fibras de acero se mantuvieron unidos a través de las fisuras por medio de las mismas fibras, a modo de costura.

- Las losas presentaron una gran variación en las deflexiones, las losas reforzadas con malla electrosoldada superaron hasta 6 veces el valor de las deflexiones generadas por las losas con fibras de acero y con concreto simple, las losas reforzadas con malla electrosoldada llegaron a deflexiones de 12.5mm, las deflexiones para losas de concreto simple fueron de 2.7mm mientras que el valor máximo de la deflexión de las losas con fibras de acero fueron de hasta 6.9 mm para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>.
- Las fibras de acero no superaron a la malla electro soldada como refuerzo principal debido a que las muestras reforzadas con malla electrosoldada alcanzaron mayores resistencias en cuanto a deflexión, carga y tenacidad. La losa de concreto simple obtuvo una tenacidad de 157.63J mientras que la losa reforzada con malla electro soldada obtuvo un incremento del 438.76% (157.63 / 849.26); el concreto con 5kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 131% (157.63 / 365.60), la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 195.95% (157.63 / 466.50) y la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 332.25% (157.63 / 681.36). Como se observa que a medida que aumenta la dosificación de fibras en la muestra aumenta su deflexión, carga y tenacidad, es posible que los resultados obtenidos sean producto de una baja dosificación de fibras, si se tiene en cuenta que el fabricante recomienda 20kg/m<sup>3</sup> como dosificación mínima.
- Los resultados de la tenacidad de las losas a 1mm y 3mm de flexión no varían en su comportamiento con respecto al punto de falla, así, es posible argumentar, que la tenacidad es proporcional a la deformación de la losa.
- Las fibras de acero ofrecen una ventaja al ser utilizadas como refuerzo principal o secundario, ya que actúan como refuerzo tridimensional, distribuyendo los esfuerzos de tensión en todo el volumen de los elementos, lo que disminuye la aparición de fisuras; y adicionalmente, debido al trabajo que realizan después de presentarse las primeras fisuras y en consecuencia la falla, las fibras de acero se entrelazan entre las fisuras, evitando la separación y proporcionando una capacidad de carga adicional después de la fractura, situación que no ocurre con el concreto simple.

- Las dosificaciones seleccionadas para realizar el estudio (5kg/m<sup>3</sup>, 9kg/m<sup>3</sup> y 18kg/m<sup>3</sup>) no generaron los resultados esperados, posiblemente la dosificación no es la óptima; además, existió una diferencia de tiempo (aproximadamente 1h) entre la fundida de las probetas simples y las probetas con fibras de acero, razón por la cual el concreto pudo haber perdido algunas de sus propiedades que se reflejan en los resultados.

## 15 Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se debe realizar un estudio siguiendo las dosificaciones recomendadas por los fabricantes, y utilizar fibras de acero de diferentes marcas, para observar las diferencias que se puedan presentar entre unas y otras.

A pesar de los resultados de este estudio, no se debe descartar el uso de fibras de acero como refuerzo principal en placas de contrapiso, es posible que sea necesario repetir los ensayos con diferentes dosificaciones hasta hallar el contenido óptimo para lograr un buen comportamiento de la losa en todas las condiciones; pues se destaca el ahorro en cuanto a mano de obra representa la utilización de esta técnica.

De acuerdo con los resultados de este estudio, se sugiere el uso de fibras de acero como refuerzo secundario, ya que impedirá la fisuración del concreto a temprana edad y en el momento de falla evitará la división de la losa, sin embargo, su aplicación sería en casos muy específicos, especialmente elementos de grandes secciones que corran mayor riesgo de fisuras, ya que se incrementaría el costo mismo del elemento a construir.

## 16 Referencias Bibliográficas

- ACI. (2009). American Concrete Institute. Retrieved 05 04, 2016, from <https://www.concrete.org/>
- ASCC. (2009). American Society of Concrete Contractors. Guia del contratista para la construcción en concreto de calidad, 14.
- Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2002). MECANICA DE MATERIALES. Santafé de Bogotá: McGRAW- HILL.
- Carrillo, J., & Silva Paramo, D. (2015). Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno.
- Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. (abril de 2012). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C.
- DANE. (2005). Censo General 2005 Déficit de vivienda. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Retrieved 05 2016, 25, from <http://www.dane.gov.co/>
- Farbianz, J. (2001). Hormigón el material. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Felipe, M. (2015). Aplicación de concreto reforzado con fibras sintéticas en losas de contrapiso para viviendas de interés social. Bogotá.
- Hadi, M. (2008). University of Wollongong. Retrieved junio 14, 2016, from <http://ro.uow.edu.au/engpapers/477/>

Henao Padilla, M. J. (2011). Análisis del proceso de producción privada de vivienda de interés social (vis) en Colombia en el periodo 2007-2010 a partir del macro proyecto de interés social nacional ciudad verde. Universidad del Rosario, Bogotá.

Khaledmarar, Ozgureren, & Tahircelik. (2001, abril/mayo/junio). Relationship between flexural toughness energy and impact energy of high strength fiber reinforced concrete (HSFRC). *Materiales de Construcción*, 51(262).

Lambrechts. (2011). "Fibras de acero y sintéticas para el refuerzo del concreto", Folleto informativo. Barcelona, España: Bekaert.

Marmol Salazar, P. C. (2010). Hormigones con fibras de acero, características mecánicas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014, 06 18). Min vivienda. Retrieved 05 01, 2016, from <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerios/viceministerio-de-vivienda/vis-y-vip/pol%C3%ADtica-vis-y-vip>

Molina Javier, V. M. (1999). Ensayo Sísmico de Estructuras. 0214(4557).

Navas Carro, A., & Rojas Juarez, J. L. (2010). Comportamiento de losas apoyadas en suelo utilizando concreto reforzado con fibras metálicas. *Ingeniería* 20.

NTC-673. (2000). Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. In Icontec. Bogotá D.C.: Icontec.

NTC722. (2000). Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto (3 ed.). Bogotá: Icontec.

Park, R., & Paulay, T. (1978). Estructuras de concreto reforzado. México D.F: Limusa S.A.

Petrone. (n.d.). Shake table tests for the seismic assessment of hollow brick internal.



Proalco - Bekaert. (2016, 05 16). Proalco Bekaert. Retrieved from <http://www.proalco-bekaert.com>

Que es una viga. (2012). Arqhys, 12. Retrieved agosto 2016, from <http://www.arqhys.com>

RILEM. (2000). International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures. Retrieved 05 07, 2016, from [http://www.rilem.org/gene/main.php?sizeup\\_=&sizeup2009=&referer2=&poste=1600x900x24](http://www.rilem.org/gene/main.php?sizeup_=&sizeup2009=&referer2=&poste=1600x900x24)

Sanada, K. M. (2011). Effects of nonstructural brick infills on a Indonesian earthquake damage building. 1877(7058).

Seddik y Bencheikh, M. y. (2009). "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. In Construction Building and Material Journal (pp. 3196-3205).

Segura Franco, J. I. (2011). Estructuras de Concreto I. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Subcomité de Fibras ICONTEC. (2007, agosto). Construcción y Tecnología. Retrieved 10 03, 2016, from [www.imcyc.com](http://www.imcyc.com)

The Concrete Society. (2003; 2006). The Concrete Society. Retrieved 05 07, 2016, from <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=844>

## **17 Anexos**

### **17.1 Anexo A - Paper**

**"Aplicación de concreto reforzado con fibras de acero en losas de contrapiso para viviendas de interés social"**

## APLICACIÓN DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO PARA LOSAS DE CONTRAPISO EN VIS

### J.C. HERRERA

Prof. Ing. Civil  
MS.c Estructuras  
Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá; Colombia  
juan.herrera@unimilitar.edu.co

### L.F. MENDIETA

Ing. Civil  
Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá; Colombia  
d7300988@unimilitar.edu.co

## RESUMEN

Durante los últimos años se han realizado diversos estudios para desarrollar y fabricar tipos específicos de fibras que respondan a las diversas necesidades constructivas, tal como es el caso de las fibras de acero, que mejoran la matriz del concreto cuando este se somete a esfuerzos de flexión, tracción y compresión; además de ofrecer rapidez en la ejecución de obra y economía, características que lo hacen muy atractivo y competitivo en la industria de la construcción. Por esta razón, se desarrolló un proyecto de investigación con el fin de evaluar el comportamiento de un concreto de 21 MPa, reforzado con fibras de acero (CRFA) Dramix RL 45\_50 BN y establecer la relación entre la adición de las dosificaciones de las fibras (9, 15 y 18 kg/m<sup>3</sup>) y la variación en las propiedades físicas (asentamiento, manejabilidad y contenido de aire) y mecánicas (resistencia a compresión, tensión indirecta, resistencia a la flexión, módulo de rotura y absorción de energía).

## INTRODUCCIÓN

El uso de las fibras en materiales de construcción se remonta hasta antes de la aparición del cemento Portland y del concreto. Fibras naturales como pasto, fique, junco y pelo animal han sido tradicionalmente agregadas al adobe para disminuir su tendencia a la fisuración y mejorar el desempeño del material a esfuerzos de tensión (Subcomité de Fibras ICONTEC, 2007). Investigaciones han demostrado que la adición de fibras de acero mejora las características mecánicas del concreto, ya que, al estar distribuidas por todo el volumen de concreto de manera tridimensional, presentan un mejor comportamiento que el refuerzo convencional (malla electrosoldada o barras de acero) armado en dos direcciones.

La aplicación de fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN en el área de la construcción es bastante variada, pues se aplican a pisos de concreto (industriales y bodegas), recubrimiento de túneles, estabilización de taludes, construcción de piscinas y pavimentos. Ofrecen un importante beneficio, pues reducen directamente los costos de mano de obra y tiempo de ejecución gracias a su sencilla implementación, ya que solo debe mezclarse con el cemento en estado fresco en cualquier mezclador y no requiere de equipo especializado o mano de obra calificada para su manipulación.

El proyecto estuvo encaminado a evaluar los resultados obtenidos al agregar tres dosificaciones diferentes (5kg/m<sup>3</sup>, 9kg/m<sup>3</sup> y 18kg/m<sup>3</sup>) de fibras de acero Dramix RL 45\_50 BN a un concreto de 21MPa; el programa experimental incluyó el ensayo de 43 especímenes (cilindros, vigas y losas) a partir de las normas técnicas colombianas (NTC): asentamiento (NTC-396), contenido de aire (NTC-1032), masa unitaria (NTC-1926), resistencia a la compresión (NTC-673), resistencia a la tensión indirecta (NTC-722), resistencia a la flexión (NTC-2871), absorción de energía (NTC-5721).

A partir de los resultados obtenidos acerca de las propiedades físicas y mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero, se procedió a la parte comparativa con las fórmulas que existen para hallar la absorción de energía (tenacidad) analizando el comportamiento de las placas de concreto con el fin de determinar si las dosificaciones utilizadas de fibras de acero pueden igualar el desempeño de la malla electro soldada, y con ello evaluar el cambio de refuerzo principal de la malla electro soldada por las fibras de acero. Los resultados que arrojó la investigación, determinaron las ventajas y desventajas ofrecidas por las fibras de acero si se usan como refuerzo principal en placas de contrapiso.

Se realizó un análisis comparativo de costos para una losa de 36 m<sup>2</sup> x 0.10 de espesor (promedio de una vivienda VIS) con el objetivo de identificar las variaciones en cuanto a costo-beneficio, entre las losas reforzadas con malla electrosoldada y las reforzadas con fibras de acero, y así observar las ventajas económicas que ofrece cada sistema.

## 1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 1.1 Características del concreto

Argos S.A. fue la empresa encargada del diseño de mezcla para el concreto utilizado en esta investigación; de acuerdo con las recomendaciones del método de volúmenes absolutos especificado en el ACI 211.1 (ver tabla 1). Las especificaciones están formuladas para un concreto de 21 MPa a los 28 días de edad, con un asentamiento promedio de  $150 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ , esto con el objetivo de garantizar un mezclado apropiado con las fibras de acero. A este mismo diseño de mezcla se le adicionaron fibras de acero en dosificaciones de 5, 9 y 18 kg/m<sup>3</sup>, sin realizar ninguna variación sobre el concreto base.

**Tabla 1. - Mezcla para concreto 21MPa**

<i>Descripción</i>	<i>Diseño 1m<sup>3</sup> (kg)</i>	<i>Humedad %</i>
Cemento RIO C1	298	0.8%
Grava SAL 1"	989	5.5%
Arena de río	790	4.5%
Arena de peña	198	
Agua	170	
SIKA PLAST D7	1.79	
SIKA Viscoflow 70C	1.34	

Fuente. Argos S.A. (2014)

### 1.2 Características de las fibras de acero

Para este estudio, se utilizaron fibras Dramix RL-45/50-BN, que actúan como refuerzo en tres dimensiones, reemplazando la malla electro soldada o varilla utilizada en placas de contrapiso y pavimentos que soporten cargas livianas hasta 500 kg/m<sup>2</sup>; (Proalco - Bekaert, 2016). El concreto que es reforzado por medio de fibras de acero (CRFA) es un elemento que contiene fibras uniformemente distribuidas y orientadas al azar y son añadidas al concreto durante el proceso de mezcla. En la tabla 2 se muestran las especificaciones generales de las fibras de acero empleadas.

**Tabla 2 – Especificaciones técnicas fibras de acero Dramix RL-45/50-BN**

<i>Morfología</i>	Lisas con ganchos en los extremos
<i>Diámetro</i>	1.05 mm
<i>Longitud</i>	50 mm
<i>Relación longitud -diámetro</i>	45 mm
<i>Cantidad / kg</i>	2800 unid
<i>Esfuerzo a la tensión</i>	1115 MPa
<i>Módulo de elasticidad</i>	21000 MPa

Fuente. Elaboración propia a partir de ficha técnica Dramix

### 1.3 Características de la malla electrosoldada

La malla electrosoldada está compuesta por alambres de acero grafilados de 5 mm de diámetro, con una separación de 150 mm en las dos direcciones, y electrosoldados en todos los puntos de contacto. La malla está fabricada bajo las normas NTC 5806 y NTC 2310. La resistencia nominal del grafil que conforma la malla es de 485 MPa. La cuantía de las losas está determinada por el título C.7.12 de la NSR-10.

### 1.4 Fabricación de los testigos

Los especímenes del estudio corresponden a cilindros de concreto (medidas estándar 150 mm x 300 mm), vigas de concreto (medidas estándar 150 mm x 150 mm x 600mm) y losas de concreto (medidas estándar 600 mm x 600 mm x 100 mm). La metodología empleada para la fabricación de los testigos corresponde a la norma NTC 550 (ASTM C-31), y la toma de muestras a la NTC 454 (ASTM C-172). La tabla 3 presenta un resumen del tipo de ensayo, así como la cantidad de testigos que fueron ensayados para el concreto en estado fresco y endurecido.

**Tabla 3. Especímenes de concreto Fundidos**

Ensayo	Tipo de muestra	Concreto Simple		Concreto Reforzado con fibras de acero (dosificaciones)			Total
		Muestra concreto simple	Muestra con Malla electro-soldada	5 kg/m3	9 kg/m3	18 kg/m3	
Resistencia a la compresión	Cilindro	2	N/A	2	2	4	10
Resistencia a la tensión indirecta (compresión diametral)	Cilindro	4	N/A	3	3	3	13
Resistencia a la flexión	Viga	3	N/A	3	2	3	11
Absorción de energía (flexión en losas)	Losa	1	2	2	2	2	9

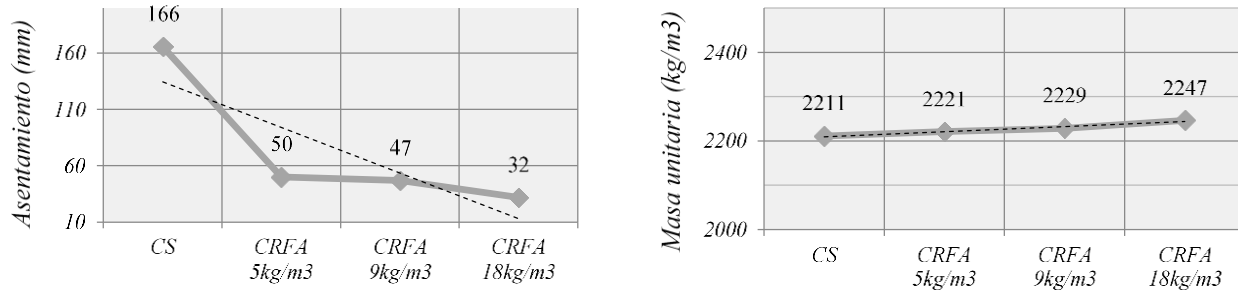
Fuente. Elaboración propia

## 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Teniendo en cuenta que las dosificaciones de fibra de acero empleadas fueron 5, 9 y 18 kg/m3 respectivamente, que equivalen a fracciones de volumen de 0.06%, 0.11% y 0.23% (Carrillo & Silva Paramo, 2015, p. 4), se presentan los siguientes resultados:

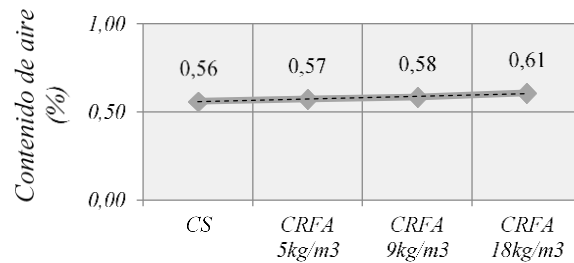
### 2.1 Concreto en estado fresco (propiedades físicas)

El ensayo de asentamiento se adelantó según lo establecido en el proceso metodológico de la NTC 396. Para la muestra de concreto con fibras de acero y concreto simple se obtuvieron los resultados que se muestran en el gráfico 1a. La diferencia entre el asentamiento del concreto con fibras de acero y el concreto simple, se debe a que la presencia de las fibras de acero reducen considerablemente el asentamiento, gracias al efecto de enganche que realizan dentro de la mezcla de concreto; sin embargo, no se debe interpretar este resultado asumiendo que la adición de la fibra de acero produce de manera inmediata tal pérdida de asentamiento, ya que, por la logística implementada durante la ejecución del ensayo, las muestras de CRFA solo pudieron ser tomadas después de una hora de haber realizado el ensayo sobre las muestra de CS. Sin embargo, si es comparable entre los CRFA que a medida que se aumenta la dosificación de las fibras, se produce pérdida de asentamiento en la mezcla.



a) Asentamiento

b) Masa unitaria



b) Contenido de aire

Gráfico 1. Propiedades físicas del concreto

La masa unitaria y contenido de aire se determinaron siguiendo el método establecido en la norma NTC 1926. Según la NSR-10, el concreto de peso normal tiene una densidad entre 2155 y 2555 kg/m<sup>3</sup>; todos los resultados de masa unitaria se encuentran dentro del rango anteriormente mencionado; a medida que aumentó la dosificación, se incrementó la masa unitaria un 0.45%, 0.81% y 1.63% respectivamente (gráfico 1b). Los resultados no registran cambios significativos del contenido de aire entre las diferentes muestras (grafico 1c); para la de CS se obtuvo un contenido de aire del 0.56%, las muestras de CRFA dosificación 5kg/m<sup>3</sup> fue 0.57%, 9kg/m<sup>3</sup> fue 0.58% y para 18kg/m<sup>3</sup> fue 0.61%; resultando una diferencia máxima de 5 puntos entre la muestra de CS y la de CRFA de 18kg/m<sup>3</sup>; se destaca que las fibras aumenta los vacíos internos en la pasta de cemento, fenómeno que posiblemente se podría apreciar si la variación en la dosificación de las fibras fuese más significativa.

## 2.2 Concreto en estado endurecido

### 2.2.1 Resistencia a compresión

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma NTC 673; de acuerdo con los resultados (gráfico 2), se determinó que no era posible relacionar la resistencia a la compresión con el contenido de aire, ya que la variación para esta última propiedad no resultó significativa. El CS tuvo un mejor comportamiento frente a las tres muestras de CRFA en cuanto a resistencia a la compresión; la muestra de CS obtuvo un resultado de 31.85 MPa, mientras que para la muestra de CRFA con dosificación de 5 kg/m<sup>3</sup> se redujo su resistencia en un 12.34% (31.85/27.92 MPa), la de 9 kg/m<sup>3</sup> bajó un 4.49% (31.85/30.42 MPa) y la muestra de dosificación 18kg/m<sup>3</sup> también disminuyo su resistencia un 8.67% (31.85/29.09 MPa). Se observó que la dosificación de 9 kg/m<sup>3</sup> obtuvo la mayor resistencia en cuanto a las muestras de CRFA.

Durante el desarrollo del ensayo se observó que, al llegar al punto de falla, las probetas de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) presentaron fisuración mas no desprendimiento de material (figura 1); opuesto a lo que sucedió con el CS, que al llegar al punto de falla generó desprendimiento; la razón por la que esto ocurre, es por la distribución tridimensional de las fibras de acero a través de la matriz del concreto, impidiendo así la separación del material.

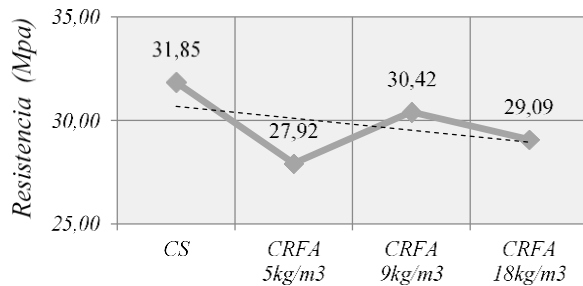


Gráfico 2. Resistencia a la compresión



Figura 1. CS y CRFA fallados a compresión

### 2.2.2 Resistencia a tensión por compresión diametral

Los ensayos de resistencia a la compresión diametral se realizaron de acuerdo a la norma NTC 722; se observó (grafico 3) que el aporte de las fibras de acero a la resistencia por tensión indirecta o compresión diametral no es significativo o representativo al realizar la comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio entre el CS y el CRFA; a pesar de que, si hubo un aumento en la resistencia para todas las muestras de CRFA, los valores resultantes son mínimos. La dosificación de 5 kg/m3 aumentó un 1.03% (2.92/2.95), y la de 9 kg/m3 se incrementó en un 1.37% (2.92 /2.96 MPa) su resistencia a la tensión indirecta, observando un comportamiento similar entre estas dosificaciones, mientras que para la dosificación de 18 kg/m3 se generó un aumento del 16.78% (2.92/3.41 MPa). se concluye entonces que las dosificaciones utilizadas no logran aumentar de manera importante la resistencia del concreto ante los esfuerzos de tensión y compresión producidos por el ensayo, por lo tanto, no amarra la matriz del concreto para restringir las deformaciones producidas.

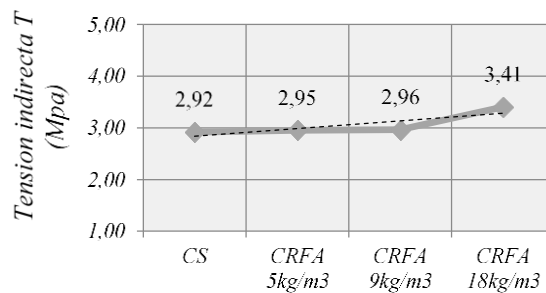


Gráfico 3. Resistencia a la tensión indirecta

Se calculó el modulo numérico de la tensión indirecta (tabla 4), teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

1. Tomando como base el documento denominado “correlación de las propiedades mecánicas” publicado en 2012 por W. Carrillo, G. Gonzales y W. Aperador, en la Universidad Militar nueva granada, quienes determinaron una ecuación que relaciona la resistencia a compresión ( $f'c$ ) con la tensión indirecta ( $f't$ ):

$$f't = \left( 0.34 + 0.0052 \left( V_f * \frac{l_f}{d_f} \right) \right) \sqrt{f'c}$$

Donde:

$V_f$  = Fracción de volumen de fibras  $V_f = D_f / \gamma_f$

$l_f$  = longitud de la fibra.

$D_f$  = Dosificación de la fibra

$d_f$  = Diámetro de la fibra.

$\gamma_f$  = Densidad.

- Aplicando la ecuación propuesta por Wafa y Ashour en 1992 y citada por W. Carrillo, D. Acosta y A. Barrera, en el documento Desempeño comprensión diametral de 2013.

$$f' t = 0.58\sqrt{f' c} + 3.02Vf$$

- Aplicando las ecuaciones propuestas por Eren y Celik en 1997 y citada por W. Carrillo, D. Acosta y A. Barrera, en el documento Desempeño comprensión diametral de 2013.

$$f' t = 1.04\sqrt{f' c} + 1.50 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$f' t = 1.08Vf + 3.82 \quad \text{Ecuación (2)}$$

**Tabla 4. Comparación de valores de tensión indirecta**

Elementos	f'c (MPa)	Tensión indirecta f't (MPa)				
		Valor Experimental	W. Carrillo G. Gonzales	Wafa y Ashour	Eren y Celik (1)	Eren y Celik (2)
CS	31.85	2.92	1.92	3.27	7.37	3.82
CRFA 5kg/m3	27.92	2.95	1.80	3.07	7.00	3.82069
CRFA 9kg/m3	30.42	2.96	1.88	3.20	7.24	3.82124
CRFA 18kg/m3	29.09	3.41	1.84	3.14	7.11	3.82248

Fuente. Elaboración propia

Una vez aplicados los modelos matemáticos para determinar la tensión indirecta (f't), se descartan los modelos de W. Carrillo y G. Gonzales por estar un 40% por debajo de los valores experimentales; el modelo (1) de Eren y Celik duplica los resultados experimentales y el (2) tampoco determina un valor convincente porque sus resultados son iguales; el modelo de Wafa y Ashour fue el que se acercó más a los resultados experimentales, sin embargo no sigue un comportamiento ascendente tal como sucede con los valores experimentales como se observa en el gráfico 4.

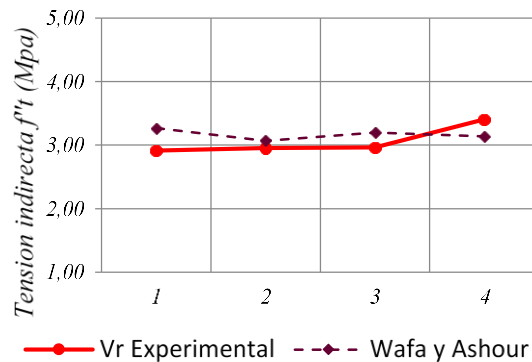


Gráfico 4. Tensión indirecta, Valor experimental VS Wafa y Ashour



### 2.2.3 Desempeño a flexión

Los ensayos de resistencia a la flexión se realizaron de acuerdo a la norma NTC 2871; los resultados muestran que el aporte de las fibras de acero, se determinó que para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> se obtuvo un incremento de 10.72% (3.73/4.13 MPa), la de 9kg/m<sup>3</sup> un aumento de 7.77% (3.73/4.02 MPa) y para la de 18kg/m<sup>3</sup> fue de 9.11% (3.73/4.07 MPa); el valor de módulo de rotura para todas las muestras de CRFA fue superior al de las muestras de CS; se observó que a medida que aumentó la dosificación de fibras de acero disminuyó su resistencia (grafico 5a), excepto entre las dosificaciones de 9kg/m<sup>3</sup> y 18kg/m<sup>3</sup>. Este aumento en la resistencia a la flexión (módulo de rotura), obedece al aporte de las fibras ante esfuerzos de tensión, ya que la matriz del concreto presenta un comportamiento frágil y las fibras generan un refuerzo tridimensional que la cose y transmite los esfuerzos entre fisuras (efecto de puenteo), lo que mejora su comportamiento.

No hubo incremento en la capacidad de absorción de energía (tenacidad), la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> disminuyó un 30% (2.26/1.58J), la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> disminuyó un 11.94% (2.26/1.99J) y la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> evidenció un pequeño aumento de 3.09% (2.26/2.33J), tal como se aprecia en el grafico 5b.

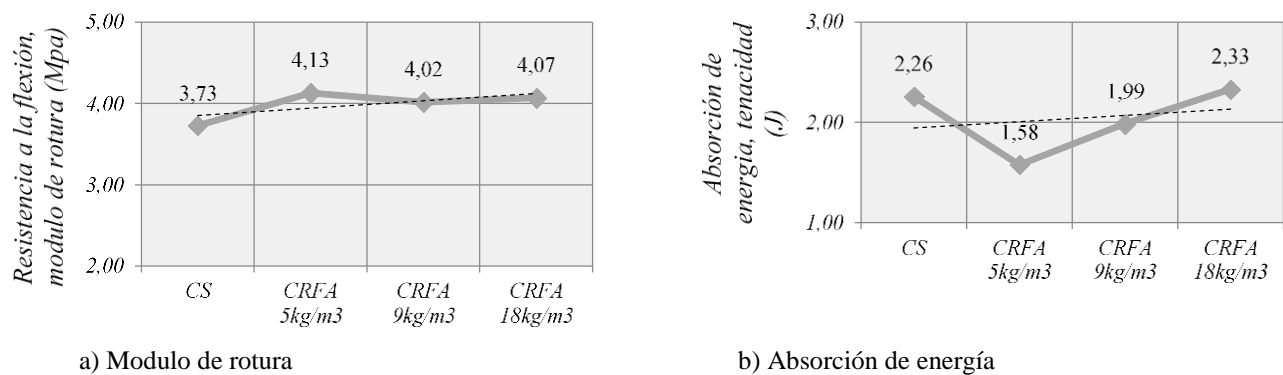
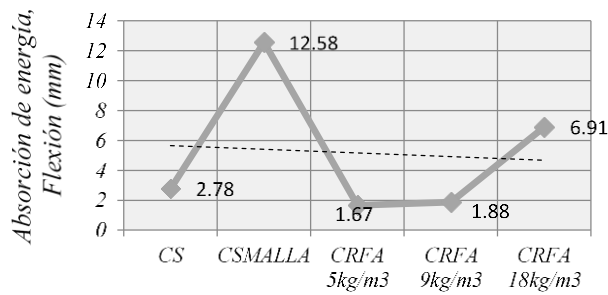


Gráfico 5. Desempeño a Flexión

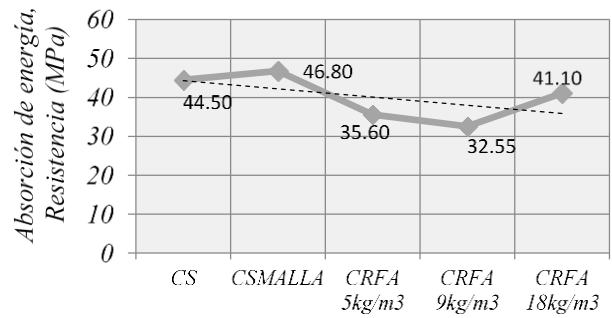
### 2.2.4 Absorción de energía

Los ensayos de absorción de energía se realizaron conforme a la norma NTC 5721 y los resultados se muestran en el gráfico 5; se observa que las fibras de acero no superan a la malla electro soldada si se usan como refuerzo principal; los resultados muestran que los valores de flexión para las losas de concreto simple, están 77.90% (12.58/2.78mm) por debajo de los valores de flexión de las losas reforzadas con malla electrosoldada (grafico 5a); en el caso de las losas reforzadas con fibras de acero, las dosificaciones de 5 y 9 kg/m<sup>3</sup>, arrojaron resultados de reducción de flexión del 86.72%(12.58/1.67mm) y 85.06% (12.58/1.88mm), que resultan incluso inferiores a los de las losas de CS; solo la para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>, se redujo notoriamente la diferencia entre las losas de CS con malla electrosoldada y las losas de CRFA, sin embargo sigue estando por debajo un 45.07% (12.58/6.91mm).

En cuanto a la resistencia a la carga (grafico 5b), las losas de CS están un 4.91% (44.50/46.80MPa) por debajo de las losas de CS reforzadas con malla electrosoldada, y con respecto a las losas de CRFA dosificación de 5, 9 y 18kg/m<sup>3</sup>, se observa una reducción de 23.93% (35.60/46.80MPa), 30.44% (32.55/46.80MPa) y 12.18% (41.10/46.80MPa) respectivamente.



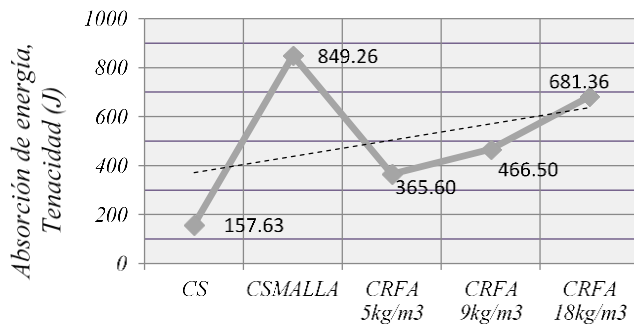
a) Flexión



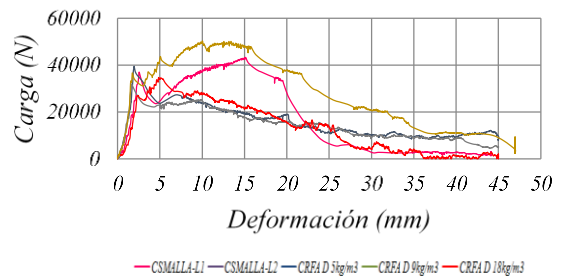
b) Resistencia

Gráfico 5. Desempeño a Flexión

Se determinó el área bajo la curva y se obtuvieron los resultados de capacidad de absorción de energía, el valor de la tenacidad (grafico 6a) o capacidad de absorción de energía, con respecto a las losas de CS reforzadas con malla electrosoldada arrojó los siguientes resultados: en el caso de las losas de CS se observó una reducción de su tenacidad de 81.44% (849.26/157.63J), las losas de CRFA tampoco superaron el valor de tenacidad de la losa de CS con malla electrosoldada, quedando para las tres dosificaciones (5, 9 y 18kg/m3) sobre los 56.95% (849.26/365.60J), 45.07% (849.26/466.50J) y 19.77% (849.26/681.36J) respectivamente. El gráfico 6b muestra las curvas carga-deflexión obtenidas para el CS, el CS con malla electrosoldada y el CRFA



a) Tenacidad



b) Carga VS deformación

Gráfico 6. Desempeño a Flexión II

En el caso de las losas simples, al llegar al punto de falla la losa sufrió desprendimiento entre sus caras, lo que demuestra la frágil matriz del concreto. Las losas reforzadas con malla tienen gran capacidad de absorción de energía debido que al fallar el concreto en tensión sigue trabajando el acero hasta llegar a la falla. Finalmente, las fibras proporcionaron mayor capacidad de absorción de energía y, por tanto, un aumento en la tenacidad del material. Al llegar a la falla las losas de CRFA no sufrieron desprendimiento en las caras.

### 3. Conclusiones

El aporte de las fibras de acero no mejora las condiciones iniciales del concreto simple, las presencia de las fibras redujo las propiedades físicas del concreto como se evidencio en el aumento del contenido de aire en 1.75% (0.56/0.57) para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup>, en 3.44% (0.56/0.58) para la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> y en 8.20% (0.56/0.61) para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>; se observó que el contenido de aire aumentó con el incremento del volumen de fibras de acero agregadas a la mezcla; el aire es introducido al momento del mezclado de las fibras con el concreto. El valor de la masa unitaria del concreto reforzado con fibras de acero permaneció casi constante a medida que se aumentó el volumen de la dosificación, aumento levemente con la aplicación de cada dosificación, para la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup>, aumento en 0.44% (2211/2220.90), para la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> aumento en 0.80% (2211/2228.82) y para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> aumento en 1.60% (2211/2246.64).

En resistencia a compresión, se evidencio que la presencia de fibras de acero no aumento la resistencia del concreto, al contrario, mostró pequeñas disminuciones en las diferentes dosificaciones; por tal motivo el aporte de las fibras de acero es nulo o despreciable; como se evidencio en las dosificaciones de 5kg/m<sup>3</sup> (27.92MPa), 9 kg/m<sup>3</sup> (30.92MPa) y 18kg/m<sup>3</sup>(29.09MPa), que se mantuvieron por debajo del concreto simple (31.85 MPa); este resultado se debe a que la presencia de fibras de acero en la mezcla aumentan el contenido de aire atrapado que se genera en el proceso de adición de las mismas, y este volumen ocupado por el aire atrapado y las fibras de acero reemplazan la pasta de cemento, y por ello se produce la reducción en la resistencia. Sin embargo, es importante destacar que en el proceso se observó que, al llegar al punto de falla, el concreto reforzado con fibras de acero presentó fisuración mas no desprendimiento de material, opuesto a lo que sucedió con el concreto simple, el cual, al llegar al punto de falla generó desprendimiento, esto ocurre porque la distribución tridimensional de la fibra de acero a través de la matriz del concreto impide la separación del material.

La resistencia a compresión diametral o tensión indirecta no se ve incrementada significativamente por la presencia de las fibras de acero en ninguna de las tres dosificaciones aplicadas (5kg/m<sup>3</sup>, 9 kg/m<sup>3</sup> y 18 kg/m<sup>3</sup>), el concreto simple genero una compresión diametral de (2.92 MPa), las dos primeras dosificaciones estuvieron por encima solo un 1.03% y 1.37% respectivamente, y la tercera fue la que mostro un mayor aumento con un 16.78%; sin embargo los resultados no son concluyentes, lo que supone que probablemente las dosificaciones utilizadas no logran aumentar de manera importante la resistencia del concreto ante los esfuerzos de tensión y compresión producidos por el ensayo, por lo tanto, no amarra la matriz del concreto para restringir las deformaciones producidas.

En módulo de rotura o resistencia a la flexión, todas las muestras reforzadas con fibras de acero en sus diferentes dosificaciones superaron a las muestras de concreto simple, esto se debe al aporte de las fibras ante esfuerzos de tensión, ya que la matriz del concreto presenta un comportamiento frágil y las fibras generan un refuerzo tridimensional que cose la matriz y transmite esfuerzos entre fisuras (efecto de puenteo), generando un mejor comportamiento ante dichos esfuerzos; el concreto simple genero un módulo de rotura de (3.73MPa) aumentando su módulo de rotura para 5 kg/m<sup>3</sup> en 10.72% (3.73/4.13MPa), para la dosificación 9 kg/m<sup>3</sup> aumento un 7.77% (3.73/4.02MPa) y finalmente al adicionar 18kg/m<sup>3</sup> aumento el módulo de rotura en 9.11% (3.73/4.07MPa). No se observó el mismo incremento en la capacidad de absorción de energía o tenacidad, la dosificación de 5kg/m<sup>3</sup> genero una disminución del 30% (2.26/1.58 J) la segunda dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> disminuyo un 11.94% (2.26/1.99 J), mientras que la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> si evidencio un pequeño aumento de 3.09% (2.26/2.33 J).

En los ensayos que se llevaron a punto de falla se observó que, en el momento de la rotura de las probetas, los elementos de concreto simple presentaron desprendimiento de material o división de los mismos, mientas que los elementos reforzados con fibras de acero se mantuvieron unidos a través de las fisuras por medio de las mismas fibras, a modo de costura.

Las losas presentaron una gran variación en las deflexiones, las losas reforzadas con malla electrosoldada superaron hasta 6 veces el valor de las deflexiones generadas por las losas con fibras de acero y con concreto simple, las losas reforzadas con malla electrosoldada llegaron a deflexiones de 12.5mm, las deflexiones para losas de concreto simple fueron de 2.7mm mientras que el valor máximo de la deflexión de las losas con fibras de acero fueron de hasta 6.9 mm para la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup>.

Las fibras de acero no superaron a la malla electro soldada como refuerzo principal debido a que las muestras reforzadas con malla electrosoldada alcanzaron mayores resistencias en cuanto a deflexión, carga y tenacidad. La losa de concreto simple obtuvo una tenacidad de 157.63J mientras que la losa reforzada con malla electro soldada obtuvo un incremento del 438.76% (157.63 / 849.26); el concreto con 5kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 131% (157.63 / 365.60), la dosificación de 9kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 195.95% (157.63 / 466.50) y la dosificación de 18kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero aumento un 332.25% (157.63 / 681.36). Como se observa que a medida que aumenta la dosificación de fibras en la muestra aumenta su deflexión, carga y tenacidad, es posible que los resultados obtenidos sean producto de una baja dosificación de fibras, si se tiene en cuenta que el fabricante recomienda 20kg/m<sup>3</sup> como dosificación mínima. Los resultados de la tenacidad de las losas a 1mm y 3mm de flexión no varían en su comportamiento con respecto al punto de falla.

Las fibras de acero ofrecen una ventaja al ser utilizadas como refuerzo principal o secundario, ya que actúan como refuerzo tridimensional, distribuyendo los esfuerzos de tensión en todo el volumen de los elementos, lo que disminuye la aparición de fisuras; y adicionalmente, debido al trabajo que realizan después de presentarse las primeras fisuras y en consecuencia la falla, las fibras de acero se entrelazan entre las fisuras, evitando la separación y proporcionando una capacidad de carga adicional después de la fractura, situación que no ocurre con el concreto simple.

## 6. Referencias

- [1] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC 2012.
- [2] Castillo M. Anotaciones sobre el problema de la vivienda en Colombia, Revista Bitácora, 2004, Vol. 1, No. 43, pp. 15-28.
- [3] Herrera J.; Martínez I. Aplicación de los concretos reforzados con fibras de acero DRAMIX en losas de pavimento, 2004, Universidad de Cartagena.
- [4] Mansour F., Abu Bakar S. & Ibrahim I. Flexural performance of a precast concrete slabs with Steel fiber concrete topping, 2014, Construction and building materials. N°75, pp, 112 – 120.
- [5] Seddik M. y Bencheik M, “Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials”, 2009, Construction Building and Material Journal, pp. 3196-3205.
- [6] Carillo J., Barrera A. y Acosta D. “Evaluación del desempeño a tensión por compresión diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306”.2013, Ingeniería y Competitividad, Vol N°1, pp 261-272.
- [7] Carillo J., Gonzales G. y Gallo L. “Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometidos a esfuerzos de compresión”.2013, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol N°23-1, pp 117-133.
- [8] Carillo J., Gonzales G. y Aperrador W. “Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero”.2013, Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol N°14-3, pp 435-450.
- [9] Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2002). MECANICA DE MATERIALES. Santafé de Bogotá: McGRAW- HILL.
- [10] Carrillo, J., & Silva Paramo, D. (2015). Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno.
- [11] Proalco - Bekaert. (16 de 05 de 2016). Proalco Bekaert. Obtenido de <http://www.proalco-bekaert.com>
- [12] Subcomité de Fibras ICONTEC. (agosto de 2007). Construcción y Tecnología. Recuperado el 03 de 10 de 2016, de [www.imcyc.com](http://www.imcyc.com)