

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA  
EN VIGAS EN VOLADIZO CON UHPC SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS



ANDRÉS FELIPE MACHUCA QUINTERO  
PATRICIA ALEJANDRA SARMIENTO MARCANO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2016-1

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA  
EN VIGAS EN VOLADIZO CON UHPC SOMETIDAS A CARGAS CÍCLICAS

ANDRÉS FELIPE MACHUCA QUINTERO  
PATRICIA ALEJANDRA SARMIENTO MARCANO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN  
INGENIERÍA CIVIL

DIRECTORES: ING. YEZID ALEXANDER ALVARADO VARGAS  
ING. DANIEL MAURICIO RUIZ VALENCIA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C

2016-1

## AGRADECIMIENTO

*Ante todo a Dios, quien me dio sabiduría, inteligencia y el entendimiento de la ciencia a través de su espíritu y puso a todas las personas que me ayudaron a culminar esta investigación.*

*A mis padres, Augusto Sarmiento y Magdalena de Sarmiento quienes me apoyaron en la distancia y fueron el motor para llegar a donde estoy.*

*A mis hermanos Francisco y Ana Carolina quienes también me ayudaron durante el proceso e inclusive con algunas tareas para esta investigación.*

*A mis asesores Daniel Mauricio y a Yezid Alexander por creer en mí y fortalecerme en cada paso de este desarrollo profesional.*

*A Fredd porque sin su apoyo incondicional y toda la fortaleza transmitida no hubiese podido llegar al final.*

*A todos los laboratoristas, en especial a Tito por toda la ayuda prestada para la realización de los ensayos.*

*Patty*

*A Dios sobre todas las cosas porque me dio serenidad, paciencia y todo lo necesario para poder salir adelante, a mis padres y hermana por el apoyo incondicional.*

*Andrés*

## **DEDICATORIA**

*Esta investigación está dedicada a todos los que creen que la ingeniería puede ayudar al mundo a ser un mejor lugar.*

*Que toda la gloria y reconocimiento que tenga esta investigación sea para Dios.*

Patty y Andrés

## RESUMEN

El colapso de edificaciones durante terremotos ha sido la principal causa de muerte de personas durante eventos sísmicos en Latinoamérica. Esto debido al uso de materiales frágiles y/o sin suficiente capacidad de disipación de energía. Varias investigaciones en Estados Unidos han demostrado que el uso del concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) en regiones de la estructura donde se forman rótulas plásticas, puede ser altamente efectiva en el incremento de disipación de energía, el control de las derivas y ser resistente al daño. Con base en lo anterior, se puede decir que el uso del UHPC en sistemas estructurales podría mejorar la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de los elementos estructurales, permitiendo que la estructura tenga un mejor comportamiento durante eventos sísmicos que aquellas elaboradas en concreto convencional (CC). Sin embargo, no se han realizado investigaciones con respecto al comportamiento del UHPC con materiales colombianos. Esta investigación persiguió la evaluación del comportamiento mecánico del UHPC en elementos de concreto a escala real, los cuales fueron sometidos a cargas cíclicas (seudodinámicas) mediante un actuador dinámico de 250 kN de capacidad (Marca MTS), obteniendo de esta manera los ciclos de histéresis de los especímenes. Todas las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana. Primero se realizaron ensayos preliminares sobre viguet de 10x10x35 cm, utilizando el 2% de dosificación de fibras metálicas sobre el volumen de concreto, variando la combinación de fibras de la siguiente manera: 100% Fibras Largas (FL), 100% Fibras cortas (FC), 50% FC-50% FL, 70% FC-30% FL, 70% FL-30% FC. Esta fase preliminar se realizó con la finalidad de obtener la combinación de fibras más favorable, la cual fue de 50% FC-50% FL (50-50). Para definir cuál fue la mejor combinación, no se tomó en cuenta la carga máxima resistida por la viga ni la máxima deflexión, sino la capacidad de disipación de energía de los elementos que se define como el área debajo de la curva fuerza-desplazamiento. Con esta

información se obtuvo la capacidad de disipación de energía, la capacidad de ductilidad al desplazamiento y el patrón de fisuración de los modelos ensayados. Esta evaluación se realizó para diferentes tipos de dosificación de porcentaje de fibra metálica: 0%, 0.5%, 1%, 1.5% y 2% con una combinación de 50% fibras tipo hooked-50% fibras cortas. Todos los resultados se compararon con elementos de concreto convencional. A la luz de los resultados experimentales la capacidad de disipación de energía de los elementos de UHPC es al menos 158% mayor que su contraparte de concreto convencional (CC).

### **PALABRAS CLAVE**

#### **En español:**

Concreto de Ultra Alto-desempeño, fibras metálicas, cargas cíclicas, capacidad de ductilidad, capacidad de disipación de energía, comportamiento histerético, nivel de fisuración, desempeño sísmico, resistencia a la compresión, comportamiento mecánico.

#### **En inglés:**

Ultra High-performance Concrete, steel fiber, cyclic loads, ductility, energy dissipation, hysteretic behavior, cracking level, seismic performance, compressive strength, mechanical behavior.

## CONTENIDO

<b>Agradecimiento</b> .....	<b>3</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>4</b>
<b><u>Resumen</u></b> .....	<b>5</b>
<b><u>Palabras clave</u></b> .....	<b>6</b>
<b><u>Lista de Figuras</u></b> .....	<b>11</b>
<b><u>Lista de Tablas</u></b> .....	<b>16</b>
<b><u>Capítulo I</u></b> .....	<b>17</b>
<b><u>1.1. Introducción</u></b> .....	<b>17</b>
<b><u>1.2. Objetivos de la investigación</u></b> .....	<b>21</b>
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	21
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
<b><u>1.3. Contenido de la tesis</u></b> .....	<b>22</b>
<b><u>Capítulo II</u></b> .....	<b>24</b>
<b><u>2.1. Conceptos básicos</u></b> .....	<b>24</b>
2.1.1. UHPC (Ultra High Performance Concrete o Concreto de Ultra Alto Desempeño) .....	24
2.1.1.1. Dosificación del UHPC.....	25
2.1.2. Capacidad de Disipación de Energía.....	26
2.1.3. Ductilidad.....	27
2.1.4. Patrones de Fisuración en el plano.....	28
2.1.5. Edificación Sismorresistente .....	29
<b><u>2.2. Estado del arte</u></b> .....	<b>29</b>
2.2.1. Propiedades mecánicas del uhpc .....	29
2.2.1.1. Resistencia a la compresión de UHPC.....	29
2.2.1.2. Resistencia a la flexión de UHPC .....	32
2.2.1.3. Capacidad de ductilidad y rigidez.....	33
2.2.2. Combinaciones de fibras metálicas y su desempeño en el UHPC.....	35

2.2.3. Estudios previos de ensayos ante cargas cíclicas.....	37
2.2.4. fisuración en UHPC.....	50
<b>Capítulo III .....</b>	<b>1</b>
<b>Metodología y resultados.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Equipos y materiales .....</b>	<b>54</b>
□    Arena silíceas.....	55
□    Cemento Argos .....	57
□    Humo de sílice.....	59
□    Reductor de agua de alto rango.....	61
□    Fibras metálicas .....	61
<b>3.2. Ensayos Preliminares.....</b>	<b>67</b>
3.2.1. proceso de elaboración de las viguetas .....	67
3.2.2. Combinación de fibras ideal.....	73
3.2.2.1. Combinación 100% fibra larga.....	73
3.2.2.2. Combinación 50% fibra corta – 50 % fibra larga. ....	75
3.2.2.3. Combinación 100% fibra Corta.....	76
3.2.2.4. Combinación 70% fibra larga – 30% fibra corta. ....	78
3.2.2.5. Combinación 70% fibra corta – 30% fibra larga. ....	79
3.2.2.6. Gráfica desplazamiento vs capacidad de disipación de energía en vigas. ....	81
<b>3.3. Proporciones de mezclas a ensayar.....</b>	<b>83</b>
<b>3.4. Ensayos de resistencia a la compresión.....</b>	<b>84</b>
3.4.1. Fabricación de los cilindros .....	84
3.4.2. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión .....	85
<b>3.5. Diseño experimental del ensayo de cargas cíclicas .....</b>	<b>87</b>
3.5.1. Dimensionamiento y despiece .....	87
3.5.2. Construcción .....	89
3.5.3. Diseño de montaje del ensayo.....	90
<b>3.6. Ensayos a cargas cíclicas.....</b>	<b>93</b>
3.6.1. Procedimiento .....	93
3.6.2. Resultados para desempeño histerético.....	95
3.6.2.1. Vigas de 0.5% de dosificación de fibras.....	95
3.6.2.2. Vigas de 1% de dosificación de fibras.....	96

<u>3.6.2.3. Vigas de 1.5% de dosificación de fibras</u> .....	98
<u>3.6.2.4. Vigas de 1.5% de dosificación de fibras (solo fibra corta)</u> .....	100
<u>3.6.2.5. Vigas de 2% de dosificación de fibras</u> .....	102
<u>3.6.2.6. Vigas de uhpc sin fibras</u> .....	103
<u>3.6.2.7. Vigas de concreto convencional</u> .....	104
<u>3.6.2.8. Comparación de ciclos de histéresis para deriva del 3% (39 mm)</u> .....	105
<u>3.6.3. energía disipada</u> .....	107
<u>3.6.4. Rigidez vs desplazamiento</u> .....	110
<u>3.6.5. Capacidad de ductilidad al desplazamiento</u> .....	112
<u>3.6.6. PUSHOVER</u> .....	113
<b><u>3.7. Patrones de fisuración en el plano</u></b> .....	<b>114</b>
<u>3.7.1. Procedimiento para medir los patrones de fisuración en el plano</u> .....	114
<u>3.7.2. Resultados del Patrón de fisuración en el plano para vigas</u> .....	115
<u>3.7.2.1. Área de fisuración con respecto al desplazamiento</u> .....	115
<u>3.7.2.2. Área de fisuración con respecto a la energía disipada</u> .....	116
<u>3.7.2.3. Patrón de fisuración en el plano</u> .....	117
<u>3.7.2.3.1. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC con 0.5% de dosificación de fibras</u> .....	118
<u>3.7.2.3.2. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC con 1% de dosificación de fibras</u> .....	119
<u>3.7.2.3.3. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC con 1.5% de dosificación de fibras</u> .....	121
<u>3.7.2.3.4. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC con 1.5% de dosificación de fibras cortas</u> .....	124
<u>3.7.2.3.5. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC con 2% de dosificación de fibras</u> .....	126
<u>3.7.2.3.6. Patrón de fisuración en el plano de vigas de UHPC sin dosificación de fibras</u> .....	127
<u>3.7.2.3.7. Patrón de fisuración en el plano de vigas de concreto convencional</u> .....	128
<b><u>Capítulo IV</u></b> .....	<b>130</b>
<b><u>Análisis y Discusión de los resultados</u></b> .....	<b>130</b>
<u>4.1. Ensayos preliminares de resistencia flexural</u> .....	130
<u>4.2. Resistencia a la compresión</u> .....	131

<b><u>4.3. Energía disipada</u></b> .....	132
<b><u>4.4. Patrones de fisuración en el plano</u></b> .....	133
<b><u>Capítulo V</u></b> .....	135
<b><u>Conclusiones y recomendaciones</u></b> .....	135
<b><u>Capítulo VI: Referencias</u></b> .....	138

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz de UHPC y de Concreto convencional.....	24
Figura 2. Momento vs rotación de una rótula plástica. ....	26
Figura 3. Capacidad de disipación de energía medida mediante ciclos de histéresis.....	27
Figura 4. Comportamiento de un material dúctil vs un material frágil. ....	27
Figura 5. Patrones de fisuración medidos de acuerdo a desplazamientos controlados. ....	28
Figura 6. Comportamiento de una edificación sismorresistente y una no sismorresistente.....	29
Figura 7. a) Aparatos para medir desplazamientos por carga axial; b) Resistencia a la compresión ganada con el tiempo de UHPFRC no tratado. ....	31
Figura 8. Ensayos de resistencia a la compresión cubos de UHPC .....	32
Figura 9. Contenido de fibras metálicas vs resistencia a la flexión.....	33
Figura 10. Efecto de los tipos de fibras con dosificación al 2% en la curva carga-deflexión a los 28 días. ....	35
Figura 11. Disposición de las fibras cortas en combinación híbrida (mezcla entre fibras cortas y largas) y disposición de fibras cortas solas dentro de un molde.....	35
Figura 12. a) medida de porosidad con respecto a la cantidad de fibras; b) efecto de tipos y dosificación de fibras vs carga máxima. ....	36
Figura 13. a) Tipos de fibras metálicas en función del diámetro y la longitud; b) Resultados de resistencia a la flexión de los tipos de fibras metálicas en función del diámetro y la longitud. ....	37
Figura 14. a) Esquema de especímenes de HPC. b) Comportamiento mecánico de vigas de HPC.....	38
Figura 15. Diseño del montaje. ....	39
Figura 16. a) Foto de los especímenes; b) Curva histéretica del comportamiento cíclico para los distintos. especímenes de mezclas.....	40

Figura 17. a) montaje para el ensayo ; b) especímenes ensayados; c) resultados de los distintos especímenes de los diferentes especímenes .....	41
Figura 18. a) Esquema del ensayo; b) Números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; c) Montaje ensayo ; d) Patrón de fisuración de los especímenes ensayados. ....	42
Figura 19. Deflexión en la mitad del tramo vs carga vertical.....	43
Figura 20. Esquema del ensayo .....	44
Figura 21. a) cargas a aplicar a los especímenes; b) Esquema del ensayo; c) Esquema del números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; d) Ciclos de histéresis obtenidos de los diferentes especímenes.....	45
Figura 22. a) Números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; b) Ciclos de histéresis obtenidos de los diferentes especímenes c) Diseño de los elementos para el ensayo; d) Mecanismo de anclaje para el ensayo. ....	46
Figura 23. Curva de desempeño "PUSHOVER".....	47
Figura 24. Capacidad de disipación de energía acumulada vs porcentaje de deriva.....	48
Figura 25. Energía disipada vs Desplazamiento.....	49
Figura 26. La separación de las fisuras en el alma de la viga I de UHPC. ....	50
Figura 27. a) Localización de la mayor fisura donde hubo la mayor concentración de esfuerzos en vigas de UHPC b) Superficie de la falla. ....	51
Figura 28. Relación de promedio de fisuración con respecto a la dosificación de UHPC.....	51
Figura 29. Diagrama de las actividades a desarrollar para cumplir los objetivos...53	
Figura 30. Arena Silíceo. ....	56
Figura 31. Granulometría arena MINGAR Zipaquirá (Cundinamarca).....	56
Figura 32. Cemento Río Claro. ....	57
Figura 33. Carbonato de calcio.....	58
Figura 34. Granulometría de Betocarb. ....	59
Figura 35. Humo de sílice EUCON MSA. ....	60
Figura 36. Granulometría humo de sílice TOXEMENT EUCON MSA. ....	60

Figura 37. Fibra DRAMIX 3D.....	63
Figura 38. Fibra DRAMIX OL 13/0.20.....	65
Figura 39. a) Cemento y Carbonato de calcio. b) Humo de sílice.....	68
Figura 40. Esferas en el proceso de fundición del concreto. ....	68
Figura 41. a) Arena silíceo. b) Fibras metálicas.....	69
Figura 42. a) Fundida de mezcla. b) Vibrado de mezcla .....	69
Figura 43. Muestras de especímenes preliminares en el cuarto de curado.....	70
Figura 44. Medición de los especímenes preliminares de acuerdo a la norma INV E 414-2013. ....	70
Figura 45. Instrumentación para ensayos de resistencia flexural de acuerdo a la norma INV E 414-2013. ....	71
Figura 46. Preparación de los especímenes preliminares para ensayos de resistencia a la flexión de acuerdo a la norma INV E 414-2013. ....	72
Figura 47 Carga vs Desplazamiento (100% FL) .....	74
Figura 48. Energía vs Desplazamiento (100 % FL). ....	74
Figura 49 Carga vs Desplazamiento (50% FL – 50% FC). ....	75
Figura 50 Energía vs Desplazamiento (50% FL – 50% FC). ....	76
Figura 51 Carga vs Desplazamiento (100% FC). ....	77
Figura 52 Energía vs Desplazamiento (100 % FC).....	77
Figura 53. Carga vs Desplazamiento (70% FL – 30% FC). ....	78
Figura 54 Energía vs Desplazamiento (70% FL – 30% FC). ....	79
Figura 55 Carga vs Desplazamiento (70% FC – 30% FL). ....	80
Figura 56 Energía vs Desplazamiento (70% FC – 30% FL). ....	81
Figura 57. Deflexión vs Capacidad de disipación de energía. ....	82
Figura 58. Fabricación de testigos para cada viga. ....	84
Figura 59. Ensayo de resistencia a la compresión. ....	85
Figura 60. Resistencia a la compresión de las mezclas ensayadas. ....	86
Figura 61. Despiece de viga en voladizo. ....	88
Figura 62. a) Formaleta de vigas en voladizo. b) Armadura dentro de la formaleta .....	89

Figura 63. Armado de vigas en voldizo.....	90
Figura 64. Fabricación de vigas en voladizo.....	90
Figura 65. Diseño de aditamentos para el montaje de vigas en voladizo para cargas cíclicas. ....	91
Figura 66. Sistema para ensayo ante cargas cíclicas.....	92
Figura 67. Gráfica de tiempo vs desplazamiento.....	93
Figura 68. Ciclos de histéresis de la viga 0.5%-A.....	95
Figura 69. Ciclos de histéresis de la viga 0.5%-B.....	96
Figura 70. Ciclos de histéresis de la viga 1%-A.....	97
Figura 71. Ciclos de histéresis de la viga 1%-B.....	98
Figura 72. Ciclos de histéresis de la viga 1.5%-A.....	99
Figura 73. Ciclos de histéresis de la viga 1.5%-B.....	100
Figura 74. Ciclos de histéresis de la viga 1.5% FC-A.....	101
Figura 75. Ciclos de histéresis de la viga 1.5% FC-B.....	102
Figura 76. Ciclos de histéresis de la viga de 2%. ....	103
Figura 77. Ciclos de histéresis de la viga sin adición de fibras.....	104
Figura 78. Ciclos de histéresis para la viga de concreto convencional.....	105
Figura 79. Ciclos de histéresis al 3% de deriva (39 mm).....	106
Figura 80. Energía disipada vs Desplazamiento.....	107
Figura 81. Viga UHPC al 3% de dosificación de fibras metálicas.....	108
Figura 82. Esquema de distribución de fibras en las vigas ensayadas.....	109
Figura 83. Energía vs Deriva del promedio de las vigas con sus respectivas dosificaciones. ....	110
Figura 84. Rigidez vs Desplazamiento.....	111
Figura 85. Capacidad de ductilidad al desplazamiento.....	112
Figura 86. Análisis de pushover.....	113
Figura 87. Área de fisuración vs Desplazamiento.....	116
Figura 88. Área de fisuración vs Capacidad de disipación de energía.....	117
Figura 89. Patrón de fisuración en el plano para la viga 0.5%-A.....	118
Figura 90. Patrón de fisuración en el plano para la viga 0.5%-B.....	119

Figura 91. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1%-A. ....	120
Figura 92. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1%-B. ....	121
Figura 93. Fisuración por retracción y asentamiento plástico en viga de UHPC. . .....	122
Figura 94. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5%-A. ....	123
Figura 95. Falla de las vigas de 1.5%. ....	123
Figura 96. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5%-B. ....	124
Figura 97. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5% FC-A. ....	125
Figura 98. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5% FC-B. ....	126
Figura 99. Patrón de fisuración en el plano para la viga 2%. ....	127
Figura 100. Patrón de fisuración en el plano para la viga de UHPC sin fibras. ....	128
Figura 101. Patrón de fisuración en el plano para la viga CC. ....	129
Figura 102. Fisura en concreto convencional (izquierda); fisura en concreto reforzado con fibras. ....	134

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuerza, módulo de elasticidad y esfuerzo en los resultados en los esfuerzos máximos a varias edades después del vaciado de muestras de UHPC con tratamiento de curado y sin curar.....	30
Tabla 2. Medidas de desempeño de columnas ensayadas en el la investigación.	48
Tabla 3. Caracterización arena.....	57
Tabla 4. Caracterización cemento Rio Claro. ....	58
Tabla 5. Propiedades de la fibra DRAMIX 3D.....	63
Tabla 6. Geometría de las fibras DRAMIX 3D. ....	64
Tabla 7. Propiedades de la fibra corta. ....	65
Tabla 8. Geometría de las fibras DRAMIX OL. ....	66
Tabla 9. Diseño de mezcla para CC. 2016. ....	83
Tabla 10. Diseños de mezcla para UHPC. ....	84

# CAPÍTULO I

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Los avances en la ciencia de los materiales como el concreto han llevado al desarrollo de una nueva clase de mezclas cementantes como lo es el Concreto de Ultra-Alto Desempeño (UHPC). Las propiedades mecánicas y de durabilidad de UHPC lo convierten en un candidato ideal para su uso en el desarrollo de soluciones a las actuales preocupaciones sobre el deterioro de infraestructura como las carreteras y para la reparación y reemplazo de estructuras. Las propiedades mecánicas y su durabilidad hacen que el UHPC sea un candidato ideal para el desarrollo de nuevas soluciones de infraestructura tanto para estructuras nuevas como para reforzamientos estructurales de edificaciones, puentes entre otros (Graybeal 2013, 1).

La primera aplicación comercial del UHPC fue alrededor de 1980 en pisos industriales y cámaras abovedadas. Posteriormente se construye el edificio Laurentienne en Montreal en 1984 con un concreto que alcanza una resistencia de 106 MPa y después se construye el Union Square en Seattle E.E.U.U. en 1988 utilizando un concreto de 145 MPa y no fue sino hasta 1985 que se hizo la primera investigación y desarrollo en los alcances de la aplicación de UHPC en construcciones (Schmidt y Fehling 2005, 7). Inicialmente el UHPC, fue usado como una aplicación especial en la seguridad industrial para construcciones de cámaras con arcos, cajas fuertes y defensas protectoras para construcciones. Es decir, que en los inicios de su aplicación no fue usado con fines sismorresistentes. Paralelamente a esto, se hacían estudios de uso del UHPC en elementos prefabricados para puentes, aplicaciones “in situ” destinadas a la rehabilitación de puentes deteriorados de concreto y pisos industriales (Buitelaar 2004, 25).

El UHPC está basado en el principio de minimizar defectos como las fisuras y los vacíos, para lograr un mayor porcentaje de la carga última potencial e

incrementar sustancialmente la durabilidad y capacidad de ductilidad del material (Zampini 2014, 55). Dentro de las propiedades mecánicas del UHPC se incluye la resistencia a compresión mayor a 21,7 ksi (150 MPa) y una resistencia a tracción prolongada post- fisuración de 0,72 ksi (5 MPa). Cabe resaltar que no existe una normativa que haga referencia a los parámetros para considerar un concreto como UHPC. Lo que diferencia a un concreto convencional del UHPC son los materiales para la mezcla y su capacidad de resistencia a la compresión. Además, posee una estructura con poca porosidad que reduce la filtración de agua, mejorando significativamente la durabilidad en comparación con otros concretos convencionales o incluso algunos concretos de alto-desempeño (HPC high-performance concrete). (Graybeal 2011).

Sin embargo, aunque se hayan hecho múltiples estudios a nivel internacional sobre el comportamiento mecánico del UHPC (Graybeal 2007; Graybeal y Davis 2008; Magureanu et al. 2012; Safeer, Soliman, y Nehdi 2015), el uso estructural, especificaciones y dosificación del UHPC, no está reglamentado por las normas en Colombia; sólo existen recomendaciones de uso basadas en algunas regulaciones actuales como las Normas Técnicas Colombianas NTC-57 (Cardona et al. 2010).

La evaluación del comportamiento de las propiedades mecánicas de cualquier material que vaya a ser usado para el diseño de estructuras es necesaria para la inclusión del material en las normas que rigen los diseños. En el caso del UHPC, es necesario dicho estudio, puesto que aún no existe su regulación en la norma colombiana que permita su aplicación para estructuras sismorresistentes. Con el avance de las herramientas tecnológicas en los materiales para la construcción e investigaciones realizadas en otros países (Güvensoy et al. 2004, Shao y Mirmiran 2005; Ganesan, Indira y Abraham 2007; Xue et al. 2008; Srinivas 2009; Xue et al. 2011; Mirmiran y Zohrevand 2013), se podría suponer que el UHPC presenta un aumento de la capacidad de disipación de energía comparado con el concreto convencional.

La aplicación de UHPC en regiones de la estructura donde se forman rótulas plásticas en vigas y columnas, mostró ser altamente efectiva en el incremento de disipación de energía, el control de las derivas y ser resistente al daño (Mirmiran y Zohrevand 2013, a). No obstante, debido a la falta de suficientes investigaciones relacionadas con la capacidad de disipación de energía en elementos estructurales que hacen parte del sistema de resistencia sísmica, no se puede regular normativamente el UHPC como material para uso estructural en Colombia. Entonces, ¿puede ser el UHPC considerado como un material con suficiente capacidad de disipación de energía para construcciones sismorresistente en Colombia?

Existe la posibilidad de que los ingenieros partícipes de un proyecto, puedan incurrir en responsabilidad penal y civil en el caso de que durante la ocurrencia de un sismo, una estructura colapse y acabe con la vida de numerosas personas, más aún si los materiales usados para los procesos constructivos o que formen parte del sistema de resistencia sísmica no estén regulados por la norma. Evaluando que los índices de mortalidad de los últimos sismos que se han registrado en Colombia, como por ejemplo el de Popayán y el de Armenia, han dado como resultado que un 70% de las muertes ocasionadas por el sismo son consecuencia de colapsos estructurales (Aguilar y Bedoya 2008).

Con base en lo anterior, se puede decir que el uso del UHPC en sistemas estructurales podría mejorar la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de las vigas, permitiendo que la estructura tenga una mayor deformación y así al terminar el sismo las personas puedan desalojar la estructura sin que ésta haya colapsado.

Actualmente en Colombia, no existen investigaciones relacionadas con la capacidad que tiene este material para disipar energía bajo cargas cíclicas. Debido

a esto, el UHPC debería ser reglamentado, mediante el anexo de un capítulo que abarque el uso de este material.

Este estudio servirá como complemento a futuras investigaciones que se realizarán en el país, ya que tiene como propósito iniciar una línea de investigación que permita evaluar y analizar la respuesta de un grupo de vigas empotradas en voladizo construidas en concreto convencional y UHPC siendo sometidas a cargas cíclicas con desplazamientos controlados mediante un actuador dinámico.

La investigación se realizó en un estudio de vigas, puesto que es ahí donde se busca que se formen las rótulas plásticas. Las vigas que fueron ensayadas tuvieron el mismo acero de refuerzo y su diseño se basó en la norma sismo resistente NSR-10 para capacidad moderada de disipación de energía (DMO). Además, el diseño de la mezcla se hizo variando la dosificación de porcentaje de fibras.

Con base en lo estudiado se puede decir que el concreto de ultra alto desempeño (UHPC) reforzado con acero y fibras metálicas, tiene la suficiente capacidad de disipar energía, para ser usado como material en vigas de un sistema estructural sismorresistente. Para ello, las variables que se tomarán en cuenta serán: la capacidad de disipación de energía (medible mediante ciclos de histéresis), desempeño histéretico (midiendo la rigidez a través de la pendiente de los ciclos de histéresis, la carga máxima resistida y el desplazamiento máximo) y el patrón de fisuración basado en el aumento de las cargas y desplazamientos.

## **1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el potencial de capacidad de disipación de energía y el patrón de fisuración de vigas en voladizo con UHPC sometidas a cargas cíclicas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar la capacidad de disipación de energía con respecto al desplazamiento de vigas en voladizo de UHPC y concreto convencional sometidas a cargas cíclicas en el extremo libre.
- Comparar el desempeño histerético de vigas en voladizo de UHPC con el desempeño de vigas fabricadas con concreto convencional.
- Comparar los patrones de fisuración en el plano generados por las cargas cíclicas en vigas en voladizo de UHPC en función de la dosificación del porcentaje de las fibras metálicas con aquellas elaboradas en concreto convencional.

### **1.3. CONTENIDO DE LA TESIS**

El trabajo de investigación titulado "Evaluación del potencial de capacidad de disipación de energía en vigas en voladizo con UHPC sometidas a cargas cíclicas" se desarrolló a través de los siguientes capítulos que se explicaran brevemente:

En el capítulo I: Planteamiento del problema, se explica la situación problema que se pretende solucionar a través del desarrollo de esta investigación, para lo cual se plantean unos objetivos teniendo en cuenta, que el propósito es aportar conocimiento para la regulación del UHPC en la norma sismorresistente.

El capítulo II: Estado del arte, presenta los conceptos relacionados con esta investigación, para facilitar la comprensión del contenido del documento. Asimismo, se hace una compilación de otros autores que han desarrollado diversos estudios, aportando conocimiento al campo de la ingeniería estructural y de materiales.

La metodología y los resultados se presentan en el capítulo III. La metodología de tipo experimental aplicada en el desarrollo de la investigación, comprende caracterización de materiales, diseños de mezcla, ensayos y equipos utilizados para la construcción de los elementos a fallar (viguetas y vigas). También se presenta en este capítulo los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia a la flexión y a la compresión, desempeño ante cargas cíclicas, y patrones de fisuración en el plano. La discusión de dichos resultados se presentará en el capítulo IV.

En el capítulo IV, se analizan y discuten los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos realizados. Las conclusiones se presentan en el capítulo V en donde además, se proponen recomendaciones para continuar desarrollando

investigaciones futuras, que aporten elementos de juicio, técnicos y científicos en este campo de la ingeniería.

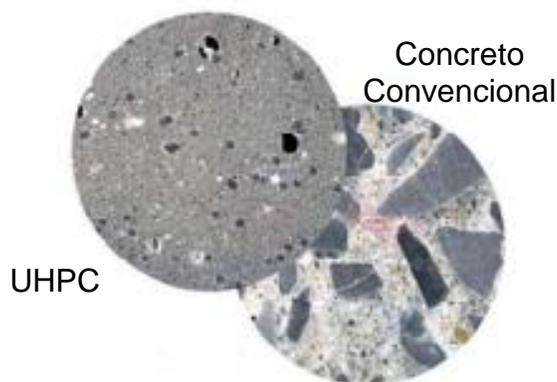
Finalmente, en el capítulo VI se presentan las referencias bibliográficas y todas las fuentes de información consultadas sobre las cuales se soporta la investigación.

## CAPÍTULO II

### 2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

#### **2.1.1. UHPC (ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE O CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO)**

Con la influencia de las nuevas tecnologías en la creación de nuevos materiales nace el UHPC. Según Graybeal, el UHPC es un material compuesto de una mezcla cementante mucho más densa, con una relación agua-cemento menor a 0,25, un alto porcentaje de fibras metálicas que a través de la eliminación de los agregados gruesos y la optimización de la masa granular, se obtiene una matriz con alta resistencia a la compresión por encima de los 150 MPa (Graybeal 2011, 1). Como puede observarse en la Figura 1, a diferencia del concreto convencional el UHPC no admite agregados gruesos en su composición, lo cual crea una matriz menos porosa y disminuye la relación de vacíos.



*Figura 1. Matriz de UHPC y de Concreto convencional.*

*Fuente: <http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/ultra-high-performance-concrete-roadmap.pdf>*

Las posibles aplicaciones de UHPC son muchas y variadas. En teoría, UHPC puede utilizarse para cualquier aplicación, ya sea estructural o arquitectónica, para el que normalmente se utilizaría el concreto convencional. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones típicas de concreto no se utilizan de manera eficiente con los materiales de UHPC.

#### 2.1.1.1. Dosificación del UHPC.

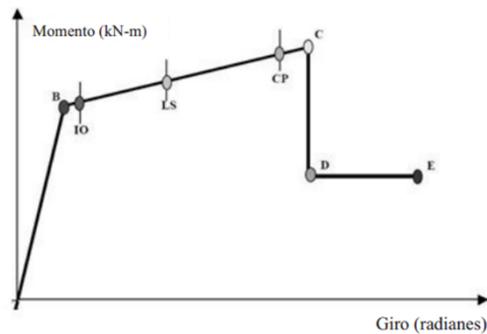
El Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) de partículas, se utiliza para dosificar el concreto relacionando el empaquetamiento de la mezcla granular con algunas propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Este modelo fue desarrollado por De Larrard (1999, 421) para dosificar los más variados tipos de hormigones, tales como los hormigones de resistencia normal, de alta resistencias, de ultra-alta resistencia, autocompactables, compactados con rodillo, etc (Espinoza 2010, 29).

El Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) se divide en dos módulos: empaquetamiento virtual y empaquetamiento real. El primer módulo corresponde a un modelo matemático que posibilita la obtención de la máxima compactabilidad posible de una mezcla granular, considerando sólo las características morfológicas de las clases granulares (Espinoza 2010, 29).

El segundo módulo corresponde al empaquetamiento real de una mezcla granular obtenido por un procedimiento físico de compactación de los granos. Los dos módulos están relacionados por medio de una ecuación implícita, cuya resolución permite el cálculo de la compactabilidad real (Espinoza 2010, 29).

## 2.1.2. CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Con el pasar de los tiempos, en la industria de la construcción, nace la necesidad de mejorar las técnicas en los procesos constructivos y en los materiales. Debido a las grandes catástrofes ocasionadas por fenómenos naturales como los sismos, se ha buscado que las edificaciones tengan mejor capacidad de disipación de energía. Por ello, se han desarrollado nuevas tecnologías para el uso de los materiales. Es decir, que la estructura pueda ser capaz de absorber la energía provocada por el sismo y disiparla, de forma tal, que pueda deformarse sin llegar al colapso y generando un nivel de daño que como máximo llegue al de seguridad de la vida como se muestra en la Figura 2. Esto se mide mediante ciclos de histéresis, que son ciclos de carga y descarga sobre un elemento y el área del interior de los ciclos de histéresis define la cantidad de energía por unidad de volumen disipada (véase Figura 3).



B; Esfuerzo de fluencia de la sección,  
IO: Nivel de ocupación inmediata,  
LS: Nivel de protección a la vida,  
CP: Prevención del colapso,  
C: Rango de seguridad limitada,  
D: Estabilidad estructural,  
E: Colapso

Figura 2. Momento vs rotación de una rótula plástica.  
Fuente: ATC 40 (1996)

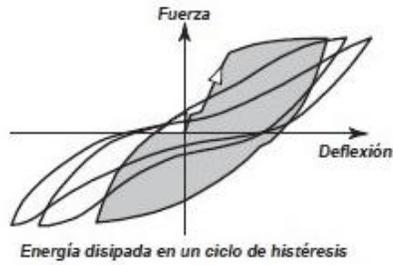


Figura 3. Capacidad de disipación de energía medida mediante ciclos de histéresis.  
Fuente: NSR-10

### 2.1.3. DUCTILIDAD

Con base en lo anterior, se desarrolla el concepto de una propiedad mecánica llamada ductilidad, que es la que se refiere a su capacidad de mantener su resistencia para deformaciones muy superiores a aquella para la que se inició la fluencia, es decir, que la estructura puede incursionar en el rango inelástico de deformación sin que llegue al colapso. La ductilidad es una propiedad muy importante en una estructura que debe resistir efectos sísmicos, ya que elimina la posibilidad de una falla súbita de tipo frágil y, además, pone en juego una fuente adicional de amortiguamiento (véase Figura 4).



Figura 4. Comportamiento de un material dúctil vs un material frágil.  
Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>

## 2.1.4. PATRONES DE FISURACIÓN EN EL PLANO

Las fuerzas laterales y verticales provocadas por los sismos, hacen que los elementos estructurales se fracturen, es decir, que se crean ciertas fisuras o grietas en los elementos tanto estructurales (vigas, columnas y muros) como en elementos no estructurales (muros de mampostería, tuberías, etc.). Para evaluar este parámetro se compara midiendo el aumento de las grietas en función de aumento de la deriva como se observa en la Figura 5. Se ha demostrado que a medida que aumenta la dosificación de fibras en mezclas con concreto convencional la fisuración externa disminuye (Ruiz et al 2014).

DERIVA	TIPO DE MEZCLA		
	CC	CF1	CF2
1%			
2%			
3%			
4%			
5%			
6%			

Figura 5. Patrones de fisuración medidos de acuerdo a desplazamientos controlados.  
Fuente: Ruiz et al. 2015.

## 2.1.5. EDIFICACIÓN SISMORRESISTENTE

Una edificación es sismorresistente cuando se diseña y construye con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y materiales con una proporción y resistencia suficientes para soportar la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes (AIS 2010)(véase Figura 6).



Figura 6. Comportamiento de una edificación sismorresistente y una no sismorresistente.  
Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS.

## 2.2. ESTADO DEL ARTE

### 2.2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL UHPC

#### 2.2.1.1. Resistencia a la compresión de UHPC

Graybeal realiza una investigación para definir una de las propiedades mecánicas del material que es la resistencia a compresión, los resultados obtenidos

son que el UHPC con refuerzo de fibras metálicas muestra una resistencia a la compresión excepcionalmente alta y un módulo de elasticidad significativamente alto en comparación con concreto convencional o HPC, pero, la deformación última es sólo ligeramente superior a la que normalmente se esperaría para el concreto convencional (ver Tabla 1) (Graybeal 2007, 146-152).

Tabla 1. Fuerza, módulo de elasticidad y esfuerzo en los resultados en los esfuerzos máximos a varias edades después del vaciado de muestras de UHPC con tratamiento de curado y sin curar.

Fuente: Graybeal. 2007.

Tiempo de ensayo [días]	Esfuerzo a la compresión, MPa (ksi)			Módulo de elasticidad, GPa (ksi)			Deformaciones unitarias		
	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar *	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar *	Número de cilindros	Promedio	Desviación estandar *
<i>Con curado</i>									
1.3	5	26.9 (3.9)	2.7 (0.36)	5	19.4 (278)	1.9 (278)	5	0.0068	0.0008
5	5	185 (26.8)	6.2 (0.92)	5	52.4 (7600)	0.8 (109)	4	0.0041	0.0005
15	6	193 (28.0)	5.5 (0.75)	6	52.5 (7620)	1.1 (162)	4	0.0040	0.0003
30	6	200 (28.9)	6.9 (0.97)	6	51.4 (7460)	1.2 (167)	4	0.0046	0.0003
55	6	194 (28.1)	8.3 (1.20)	6	52.5 (7610)	0.7 (99)	4	0.0039	0.0003
<i>Sin curado</i>									
1	3	15.2 (2.2)	1.4 (0.20)	3	10.5 (1520)	2.1 (312)	3	0.0094	0.0019
2	2	64.8 (9.4)	0.7 (0.10)	2	28.3 (4100)	0.6 (76)	3	0.0050	0.0005
3	2	73.1 (10.6)	0.7 (0.08)	2	36.0 (5220)	0.3 (43)	3	0.0039	0.0003
7	3	88.9 (12.9)	0.7 (0.09)	3	39.0 (5660)	0.8 (111)	3	0.0036	0.0008
9	2	101 (14.7)	4.1 (0.59)	2	37.6 (5450)	0.8 (112)	3	0.0034	0.0016
14	6	110 (16.0)	4.1 (0.61)	6	41.2 (5970)	1.2 (172)	6	0.0037	0.0006
28	6	119 (17.2)	3.4 (0.53)	6	41.9 (6070)	1.1 (164)	4	0.0034	0.0001
57	6	125 (18.1)	4.8 (0.69)	6	42.0 (6090)	1.0 (146)	3	0.0036	0.0002

\*En grupos que solo incluyen dos o tres cilindros, la desviación estandar es dada únicamente como un indicador de dispersión

Asimismo, Graybeal estudió la resistencia a la compresión de cilindros de 76 mm (3 pulg.) de diámetro (ver Figura 7a). En total, se obtuvieron los resultados de 138 cilindros los cuales se promediaron para determinar la resistencia a la compresión de especímenes con tratamiento de curado a los 28 días, esta resistencia fue de 193 MPa (28,0 ksi) con un 14 MPa (2.0 ksi) desviación estándar. Los resultados de 88 cilindros se promediaron para determinar la resistencia a la compresión de especímenes sin curar a los 28 días, esta resistencia fue de 126 MPa (18,3 ksi) con un 14 MPa (2.0 ksi) desviación estándar (ver Tabla 1).

Adicionalmente, se realizó la curva esfuerzo-deformación ante carga axial de acuerdo a los ensayos realizados a las diferentes edades del UHPC, teniendo que existe un aumento del 5% de resistencia a la compresión a los 56 días con respecto a los 28 días (ver Figura 7b).

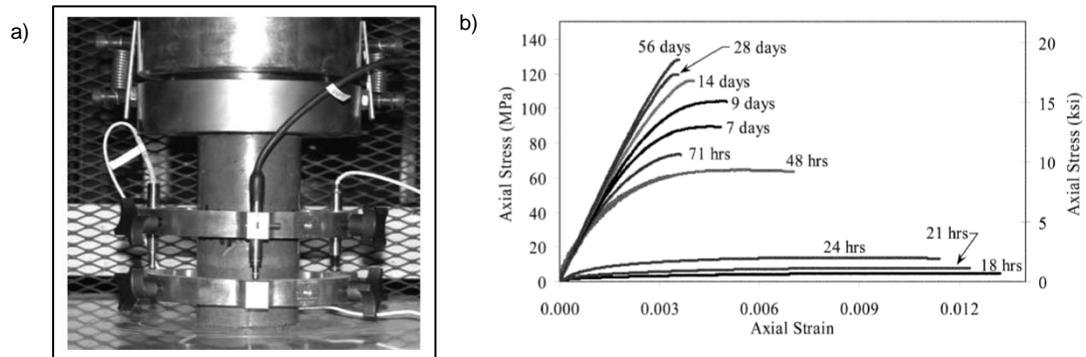


Figura 7. a) Aparatos para medir desplazamientos por carga axial; b) Resistencia a la compresión ganada con el tiempo de UHPFRC no tratado. Fuente: Graybeal, Benjamín. 2007.

Para el año 2008, Graybeal y Marshall, desarrollaron una investigación para comparar la resistencia a compresión de cilindros y cubos de UHPC (Graybeal y Marshall 2008, 603-609) y de ahí se llega a la conclusión de que la exclusión del refuerzo de fibra metálica en el diseño de mezcla de UHPFRC resultaría en un incremento del coeficiente de variación para los resultados de la resistencia a compresión.

Posteriormente, se hace un estudio de las propiedades mecánicas y la durabilidad del UHPC (Magureanu et al. 2012, 177-183) aportando resultados importantes para esta investigación como que el refuerzo híbrido de fibra, aumentó la resistencia a la compresión en un 14%, y la resistencia a la tracción entre un 70 y 174%, aunque las pruebas se hicieron con especímenes tipo cubos de UHPC (ver Figura 8).



*Figura 8. Ensayos de resistencia a la compresión cubos de UHPC  
Fuente: Magureanu et al., 2012.*

### 2.2.1.2. Resistencia a la flexión de UHPC

Graybeal desarrolló otra investigación con respecto al comportamiento flexural de vigas-I con UHPC concluyendo que las vigas I hechas en UHPC mostrarán mayor capacidad a flexión que las vigas de concreto convencional con sección transversal de similar geometría (Graybeal 2008, 602-610).

En el mismo trabajo realizado en el 2012 con respecto a las propiedades mecánicas y la durabilidad (Magureanu et al. 2012, 177-183), se llegó a la conclusión de que dependiendo del tamaño de la muestra y la adición de fibras metálicas híbridas existe un aumento de la resistencia a la flexión UHPC en 140 %.

Más recientemente en el 2016 se han realizado investigaciones variando la dosificación, la combinación de fibras y su influencia en las propiedades mecánicas del UHPC. Este estudio investigó los efectos de tres tipos de fibras de acero (lisas (A), onduladas (B), y tipo hooked(C)) con diferentes contenidos de fibra por volumen ( $V_f = 0\%, 1\%, 2\%$  y  $3\%$ ) sobre las propiedades mecánicas del concreto de ultra alto rendimiento (UHPC). Las propiedades involucradas incluyen trabajabilidad, resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Este estudio concluyó que las resistencias a la flexión y compresión finales aumentaron en la medida en la que

aumentó el contenido de fibras y la edad del concreto. La resistencia última a la flexión y de compresión a los 90 días de muestras UHPC sin ninguna fibra eran 105 MPa y de 19 MPa, respectivamente. Con la incorporación de fibras de acero lisas al 3%, los valores correspondientes alcanzaron más de 150 MPa y 35 MPa. Las muestras de UHPC con dosificación 3% con fibras de tipo hooked y de fibras onduladas podrían aumentar la resistencia a la compresión a los 28 días en un 48 % y 59 % en comparación con los que tienen la misma cantidad de fibras lisas como se muestra en la Figura 9 (Wu et al. 2016).

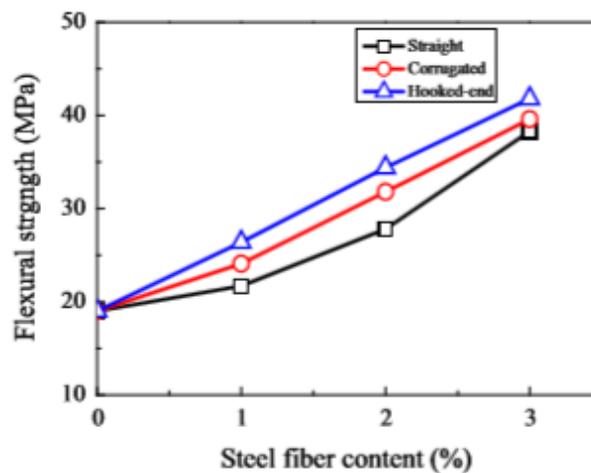


Figura 9. Contenido de fibras metálicas vs resistencia a la flexión.  
Fuente: Wu, Zemei et al. 2016

### 2.2.1.3. Capacidad de ductilidad y rigidez.

Para el año 2013, Mirmiran y Zohrevand presentan los resultados de dos investigaciones. La primera fue el estudio del efecto en columna del comportamiento cíclico de UHPC recubierto con tubos hechos de polímeros (2013a, 379-388). En esta investigación, los resultados de todos los especímenes de columnas de UHPC recubierta con los tubos de polímeros con casi el mismo espesor de diámetro que el concreto convencional, mostraron mayor rigidez y resistencia, pero ligeramente menor capacidad de ductilidad, comparado con el espécimen de concreto convencional. También, indicaron que incrementar las dosis del refuerzo de fibras en los tubos de polímeros reduce la ductilidad.

La segunda investigación, se basó en la respuesta sísmica de columnas fabricadas con los mismos tubos de polímeros llenados con UHPC y una conclusión valiosa para esta investigación fue que este estudio mostró un mejor comportamiento cíclico del novedoso sistema de columna de tubos de polímeros rellenos con UHPC, en comparación con su contraparte el concreto convencional, a pesar de su capacidad de ductilidad al desplazamiento aparentemente menor (Mirmiran y Zohrevand 2013b, 155-169).

Además, según Wu, Shi, He y Wu, el contenido de fibras metálicas tiene poco efecto en la primera aparición de las fisuras y en la primera deflexión de la curva de carga-deflexión en el ensayo de resistencia a la flexión de UHPC, pero que existe un efecto considerable en la carga máxima alcanzada. Como se muestra la Figura 10 cuando se añadieron fibras al 2%, en las fibras lisas (A2), las tipo hooked (B2) y las onduladas (C2), la carga máxima aumentó en 46,3%, 81,1% y 61,4%, y la máxima deflexión aumentó en 76,7%, 153,3% y 123,3% respectivamente.

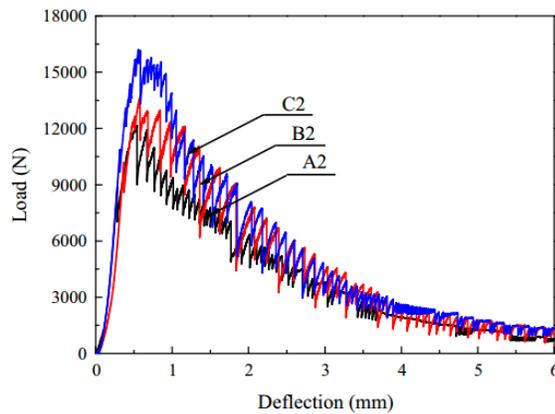


Figura 10. Efecto de los tipos de fibras con dosificación al 2% en la curva carga-deflexión a los 28 días.  
Fuente: Wu et al. 2016

## **2.2.2. COMBINACIONES DE FIBRAS METÁLICAS Y SU DESEMPEÑO EN EL UHPC**

En el 2014 se publica un artículo de investigación referente a las propiedades estáticas y el impacto del uso de fibras en el UHPC y se concluye que con la misma cantidad total de fibra metálica, la fibra híbrida en el concreto reforzado muestra mejor trabajabilidad que con un solo tipo de fibras (ver Figura 11). Asimismo, se encontró que el concreto con fibras metálicas largas (1,5% vol.) y las fibras cortas (0,5% vol.) muestran la resistencia más alta a la flexión y compresión después del curado durante 28 días (Yu, Spiesz y Brouwers 2014, 158-171).

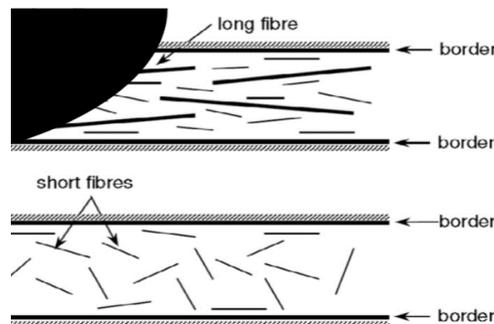


Figura 11. Disposición de las fibras cortas en combinación híbrida (mezcla entre fibras cortas y largas) y disposición de fibras cortas solas dentro de un molde.  
Fuente: Yu, Spiesz y Brouwers. 2014.

Durante el 2015 se han publicado dos artículos de investigación; el primero de Abbas, Soliman y Nehdi, el cual estudia las propiedades mecánicas y durabilidad del UHPC como la porosidad en función de diferentes longitudes de fibra y dosificaciones (ver Figura 12a), el cual demostró, que la carga máxima resistida por el UHPC aumenta ligeramente con la adición de las fibras metálicas (ver Figura 12b), mientras que la longitud de la fibra tiene efecto importante sobre la resistencia de la carga máxima puesto que las fibras más cortas llegaron a resistir mayor carga. Igualmente se observó que la adición de fibra mejora el patrón de falla frágil a un comportamiento más dúctil; esta investigación aporta a este estudio, debido a la función de las distintas dosificaciones de fibras metálicas (Abbas, Soliman y Nehdi 2015, 429-441).

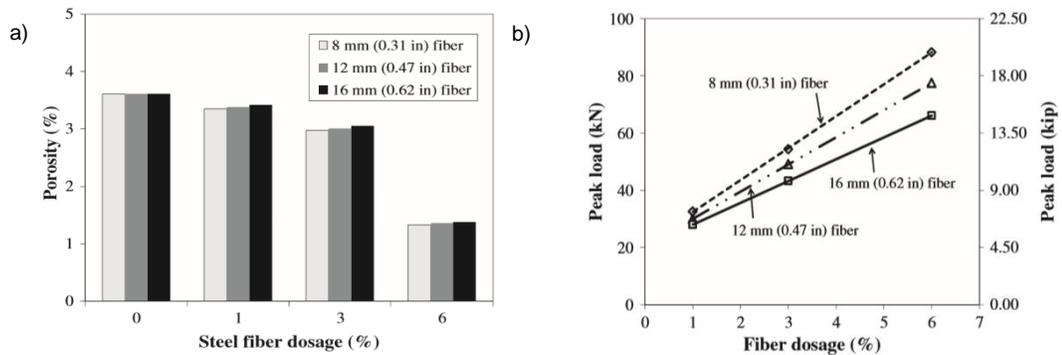


Figura 12. a) medida de porosidad con respecto a la cantidad de fibras; b) efecto de tipos y dosificación de fibras vs carga máxima.  
Fuente: Abbas, Soliman y Nehdi. 2015.

El segundo artículo de investigación publicado en el 2015 referido al desarrollo de UHPC con adición de fibras metálicas: dirigido a un el uso eficiente de la cobertura de fibras (Yu, Spiesz y Brouwers 2015, 273-282). Por su aporte a la investigación del uso de las fibras metálicas (ver Figura 13a). Esta reportó que la mejor combinación de fibras metálicas en el UHPC fue aquella que tenía los tres tipos de fibras en iguales proporciones (ver Figura 13b). Las fibras metálicas forman parte esencial de la creación del UHPC como material y para esta investigación será

un aporte importante, ya que para la ejecución de la misma se pretende utilizar una combinación de distintos tipos de fibra y diferentes dosificaciones de porcentaje de fibra.

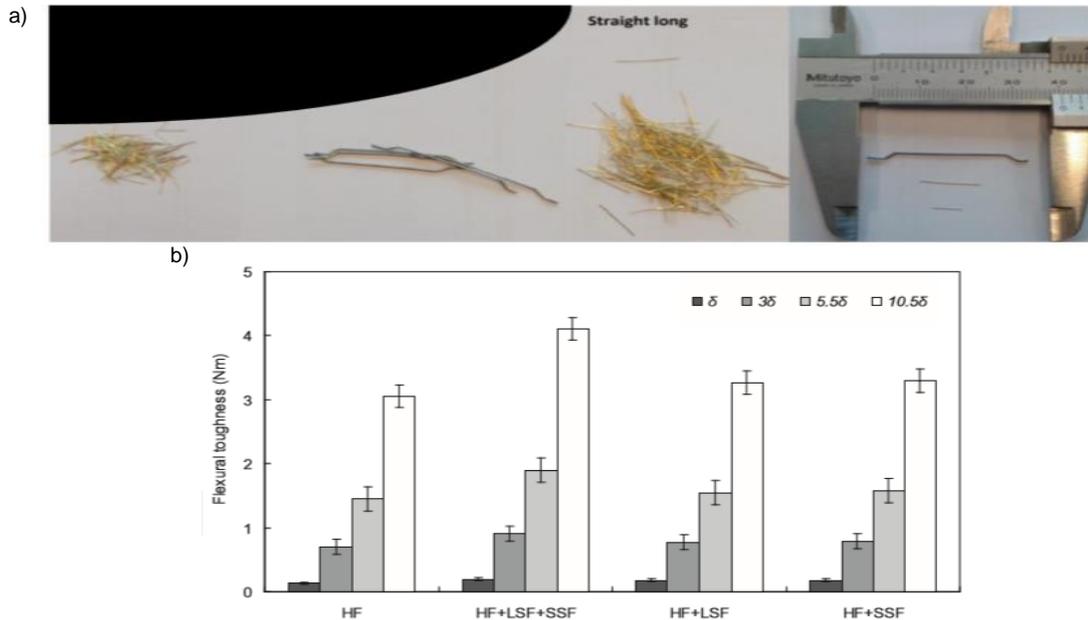


Figura 13. a) Tipos de fibras metálicas en función del diámetro y la longitud; b) Resultados de resistencia a la flexión de los tipos de fibras metálicas en función del diámetro y la longitud.  
Fuente: Yu, Spiesz y Brouwers, 2015.

### 2.2.3. ESTUDIOS PREVIOS DE ENSAYOS ANTE CARGAS CÍCLICAS

En el año 2004 es cuando se realiza el primer simposio a nivel mundial de UHPC y se da a conocer este material para utilizarlo en procesos constructivos y como alternativa para sistemas estructurales. Sin embargo, en ese evento sólo se presentaron dos ponencias que hoy en día se utilizarán como referencia de esta

investigación. La primera presentada por Güvensoy, Bayramov, Ilki, Sengül, Tasdemir, Kocatürk y Yerlikaya llamada “Mechanical Behavior of High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites under Cyclic Loading Condition” la cual, estudió el comportamiento mecánico de unas vigas con armado de acero de refuerzo (véase Figura 14a) con una mezcla cementante de HPC bajo condiciones de cargas cíclicas (véase Figura 14b) y demuestra luego de varios ensayos que la mezcla con fibras metálicas tiene un alta resistencia a la compresión y además una gran capacidad de disipación de energía frente a mezclas comunes.

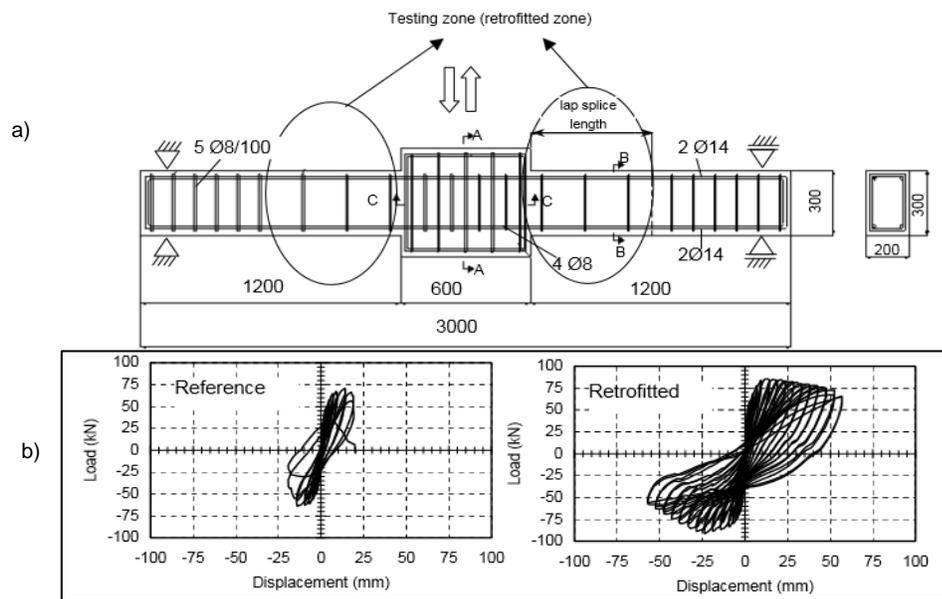


Figura 14. a) Esquema de especímenes de HPC. b) Comportamiento mecánico de vigas de HPC.  
Fuente: Güvensoy, Bayramov, Ilki, Sengül, Tasdemir, Kocatürk y Yerlikaya, 2004.

La segunda ponencia, fue la presentada por Bornemann y Faber llamada “UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading” la cual estudia el comportamiento de la fibra metálica embebida a la matriz de UHPC. No obstante, aunque la investigación estudia el comportamiento de la fibra ante cargas estáticas y cíclicas, determinando que las fibras largas ayudan al comportamiento flexural de los elementos estructurales, no estudia el

UHPC como un material compuesto de mezcla cementante con adición de fibras metálicas.

En el 2005 el Dr. Mirmiran y Shao realizan una investigación experimental del comportamiento cíclico de tubos de polímeros rellenos de concreto reforzado (véase Figura 15 y 16a) y de acuerdo con los resultados (Figura 16b) establecen que es recomendable usar una cantidad moderada de acero de refuerzo interna en el intervalo de 1-2 % ya que este refuerzo puede mejorar aún más el comportamiento cíclico de los miembros fabricados de tubos de polímeros rellenos con concreto reforzado (Mirmiran y Shao 2005, 263-272).

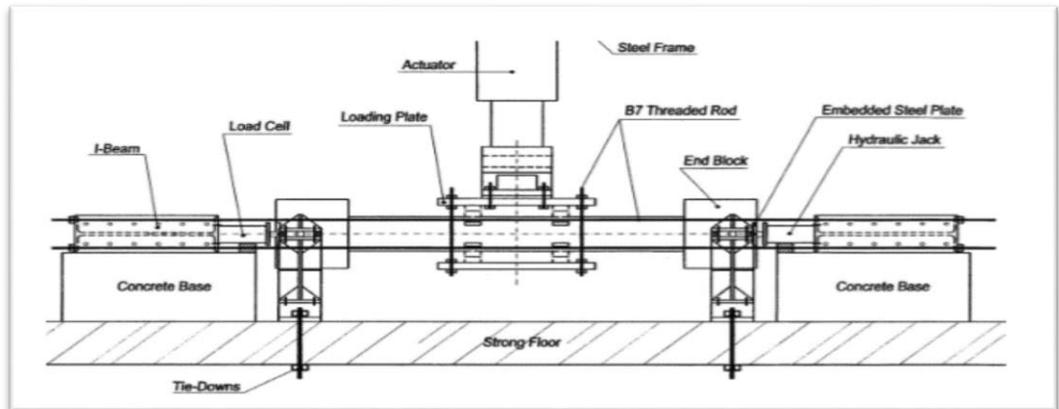


Figura 15. Diseño del montaje.  
Fuente: Shao, Yutian. y Mirmiran, Amir, 2005.

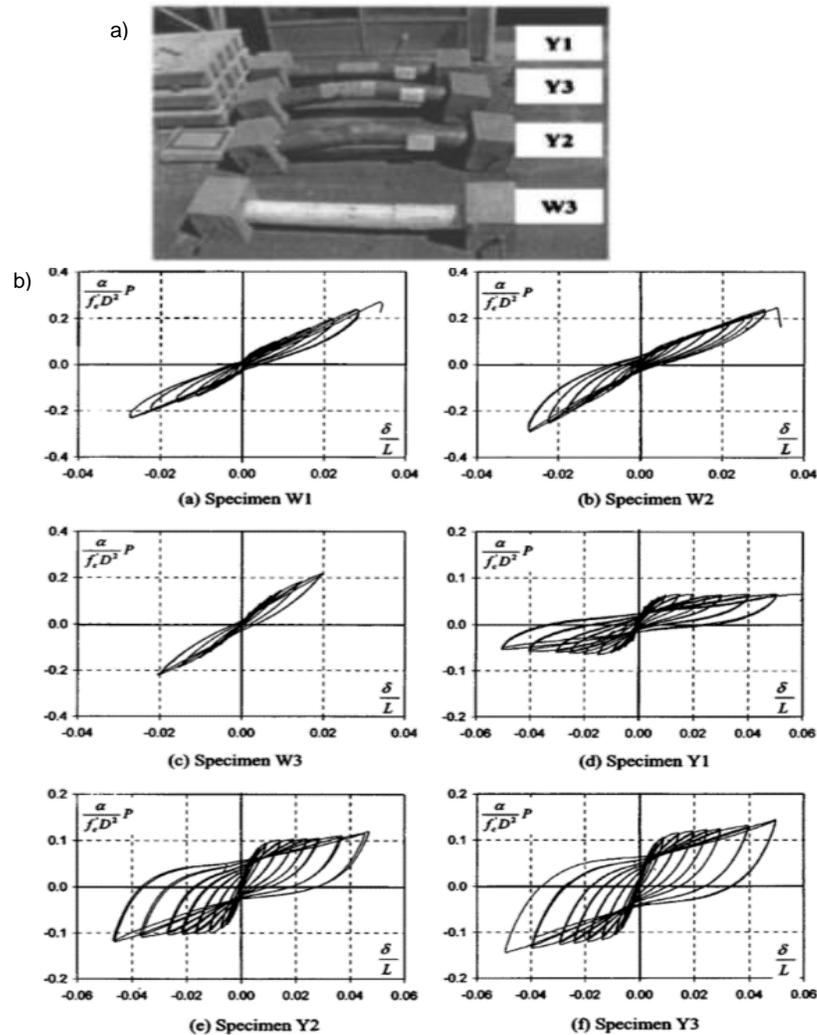


Figura 16. a) Foto de los especímenes; b) Curva histéretica del comportamiento cíclico para los distintos especímenes de mezclas.

Fuente: Shao, Yutian. y Mirmiran, Amir, 2005.

En el 2007 se desarrolló paralelamente otro estudio que generaría los resultados experimentales de diez especímenes de uniones viga-columna de HPC con refuerzo de fibras metálicas (SFRHPC) (Figura 17a) sometidas a cargas cíclicas (Ganesan, Indira y Abraham 2007, 445-456). En esta investigación las juntas se probaron bajo carga cíclica positiva y se evaluó la resistencia a flexión (Figura 17c), ductilidad y la disminución de la rigidez. Además, los resultados de las pruebas

indicaron que la provisión de fibras metálicas al HPC en las juntas mejora estos parámetros y reduce la fisuración (véase Figura 17b).

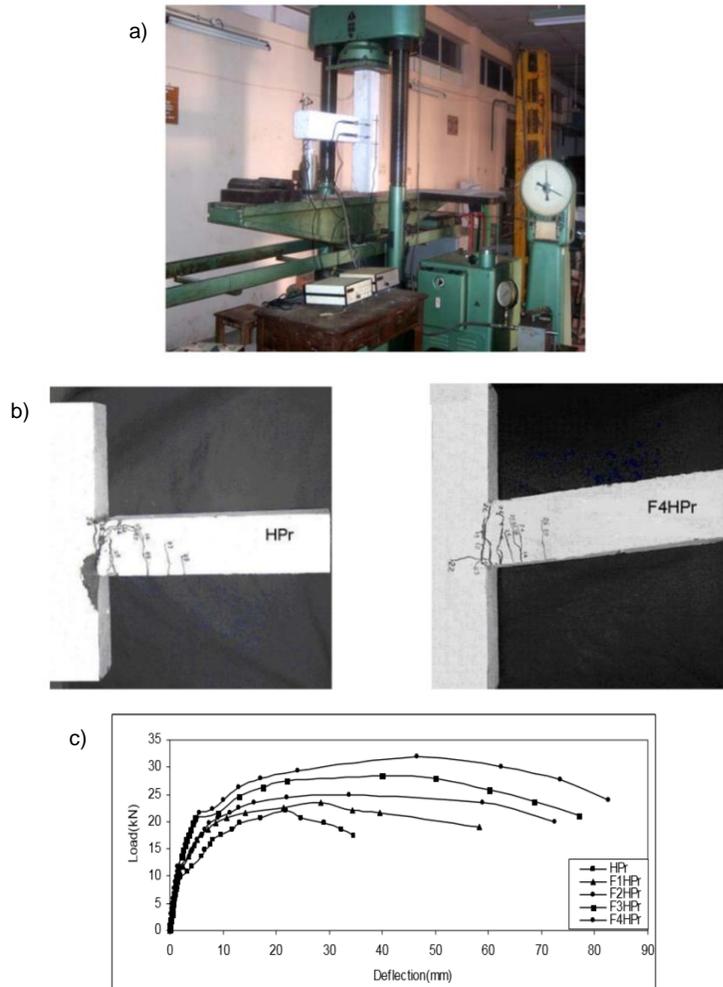


Figura 17. a) montaje para el ensayo ; b) especímenes ensayados; c) resultados de los distintos especímenes de los diferentes especímenes  
Fuente: Ganesan, Indira, y Abraham 2007.

Luego se presentan dos investigaciones que serán tomadas en cuenta para el desarrollo de la parte metodológica de este estudio: la primera, está basada en la comparación del comportamiento de vigas convencionales y pretensadas ante cargas cíclicas (Figura 18a, 18b y 18c) (Xue et al. 2008, 1014-1023). Los estudios

indicaron que las vigas normales se comportan de una manera más dúctil que las vigas pretensadas (Figura 18d) y el comportamiento histerético de las vigas normales muestra una mayor capacidad de disipación de energía en comparación con las vigas pretensadas, pero no así su capacidad de carga (véase Figura 19).

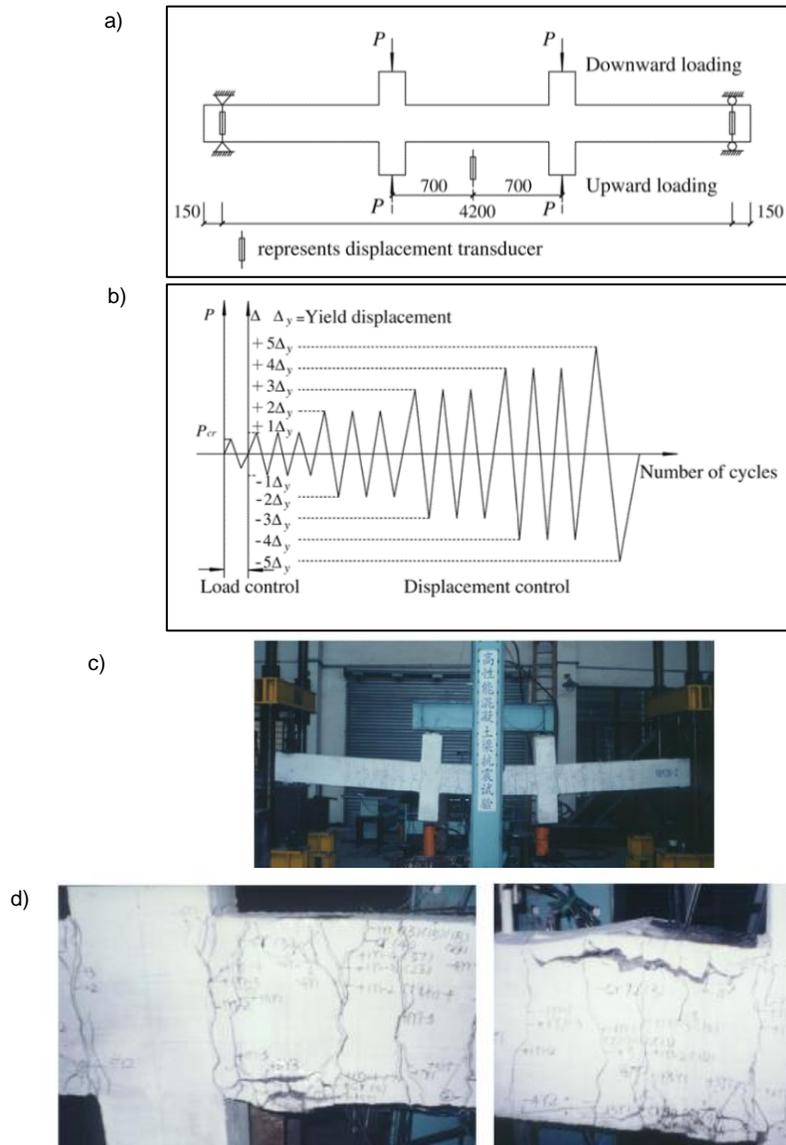


Figura 18. a) Esquema del ensayo; b) Números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; c) Montaje ensayo ; d) Patrón de fisuración de los especímenes ensayados.

Fuente: Xue, Li, Cheng y Li 2008.

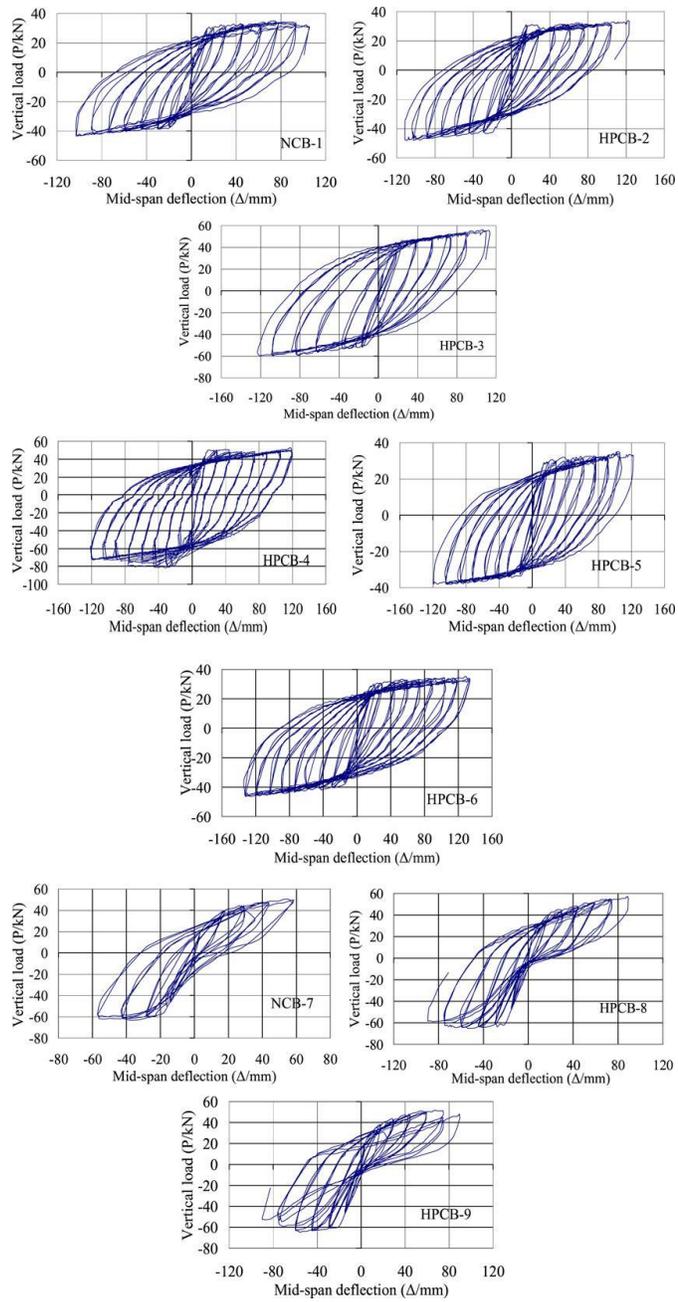


Figura 19. Deflexión en la mitad del tramo vs carga vertical.  
Fuente: Xue, Li, Cheng y Li. 2008.

La segunda investigación, es una tesis de maestría desarrollada en la Universidad de Iowa, con respecto al diseño de juntas en función de cargas laterales aplicadas en las columnas de UHPC (Srinivas 2009), está investigación aunque se

basa en el estudio del comportamiento de unas placas de diferentes materiales (Hydrostone, fibras de vidrio con resina epóxica y fibras metálicas) y colocadas en la unión de la columna con una pequeña zapata (Figura 20), el resultado significativo para esta investigación se basa en que, ante las cargas laterales aplicadas en la columna de UHPC, el material que tuvo el mejor comportamiento, en términos de resistencia a la flexión, fue la placa de fibras metálica fundida monolíticamente con el UHPC.

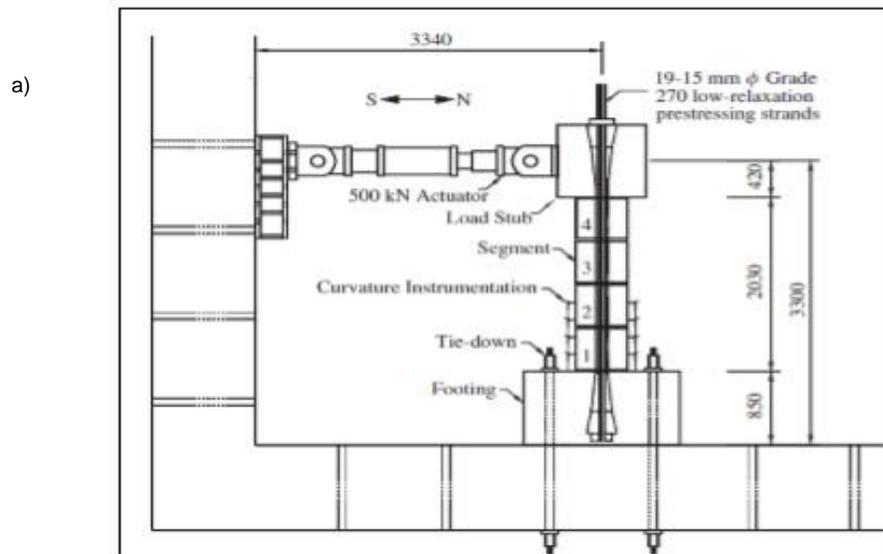


Figura 20. Esquema del ensayo  
Fuente: Srinivas Murthy, Rakesh. 2009

Para el 2011, en China se desarrolló una investigación acerca del desempeño sísmico de elementos pretensados y no-pretensados con HPC (Figura 21a) sometidos a cargas cíclicas (Figura 21b y 21c) y los resultados indicaron, que el área de histéresis de los elementos no-pretensados es mayor que la de pretensado (Figura 21d), mientras que ambos pórticos muestran relativamente alta capacidad de disipación de energía. Además, las vigas no pretensadas mostraron

poca disminución de la capacidad de carga y se comportaron de una manera dúctil en la etapa de largos desplazamientos (Xue et al. 2011, 1254-1262).

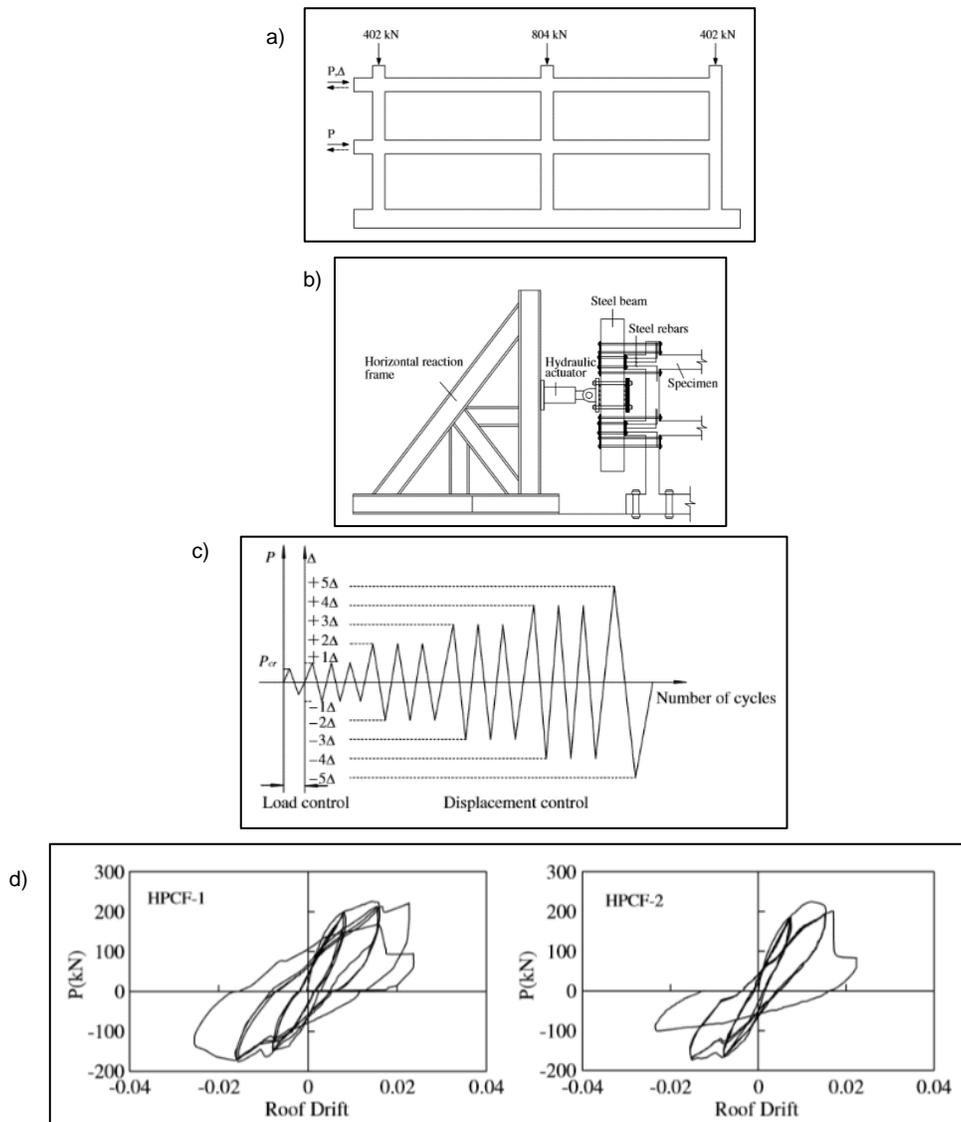


Figura 21. a) cargas a aplicar a los especímenes; b) Esquema del ensayo; c) Esquema del números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; d) Ciclos de histéresis obtenidos de los diferentes especímenes.

Fuente: Xue et al. 2011

En el 2013, Mirmiran y Zohrevand, muestran durante el estudio comparativo del comportamiento cíclico (Figura 22a y 22b) en columnas híbridas fabricadas con un tubo de polímero lleno de UHPC y concreto convencional (Figura 22c y 22d), que la falla en el espécimen de UHPC fue marcada por unas fisuras pequeñas sin quebrarse o desintegrarse a diferencia de las columnas de concreto convencional. Además, los especímenes entubados fallaron con agrietamiento en tubos de FRP en el lado del tubo donde hubo tracción (Mirmiran y Zohrevand 2013, 91-99).

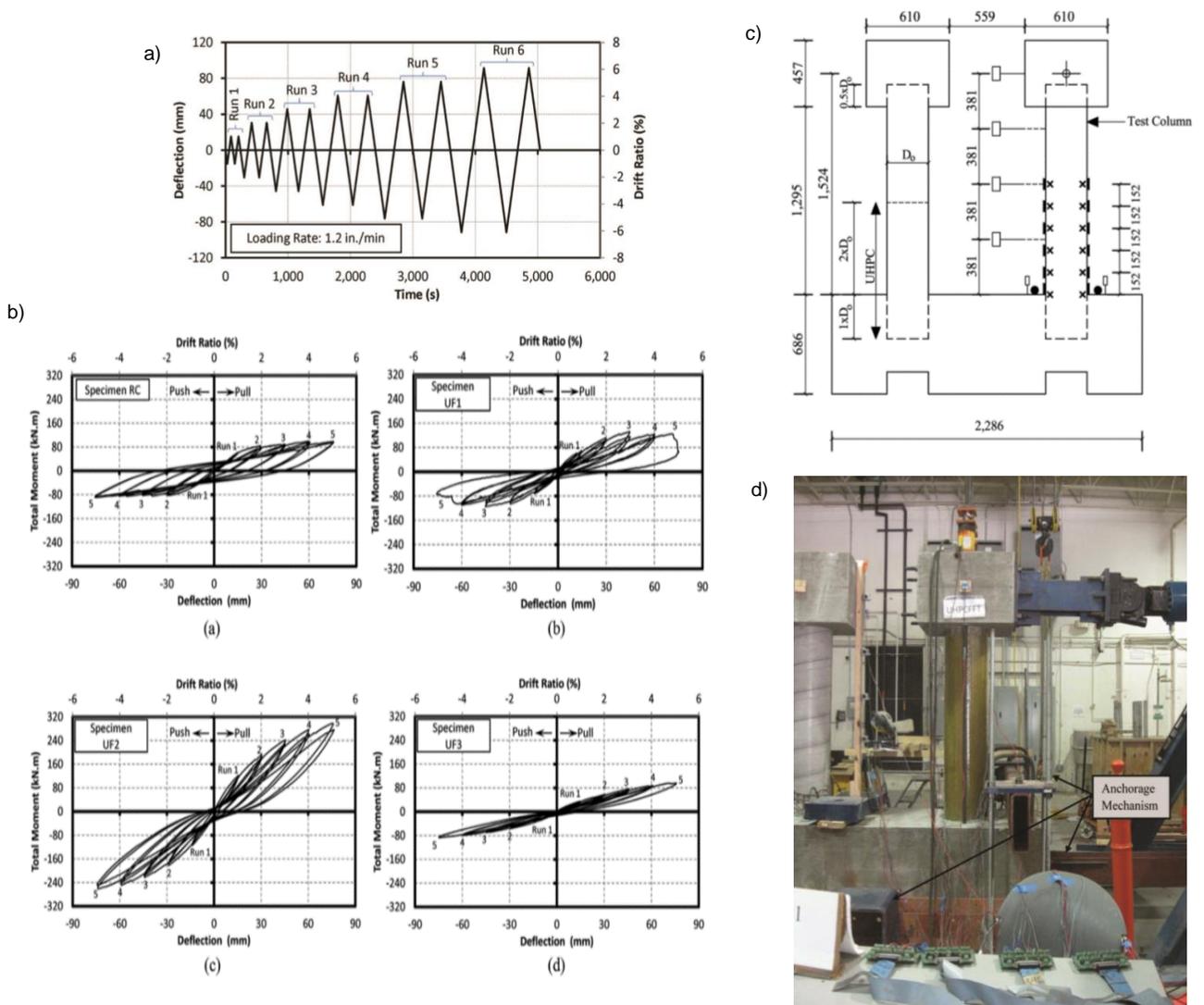


Figura 22. a) Números de ciclos vs desplazamiento aplicado al ensayo; b) Ciclos de histéresis obtenidos de los diferentes especímenes c) Diseño de los elementos para el ensayo; d) Mecanismo de anclaje para el ensayo. Fuente: Mirmiran y Zohevrاند 2013.

Ese mismo año Mirmiran y Zohrevand, desarrollan una investigación con respecto a la respuesta de columnas híbridas ante una señal sísmica. Estas estaban fabricadas con un tubo de polímero relleno de UHPC (UF), otras de la misma composición pero con refuerzo longitudinal (RUF) y otra de concreto convencional (RC). En general, este estudio demostró que ante la señal del sismo empleado el mejor desempeño sísmico (en cuanto a rigidez inicial, máxima carga y máxima deflexión) fue la del novedoso sistema de columna UHPCFFT (Tubo de polímero relleno de UHPC), en comparación con su contraparte RC (Concreto convencional) (ver Figura 23), a pesar de su ductilidad aparentemente inferior (ver Tabla 1). Las columnas de UHPC mostraron una mayor capacidad de disipación de energía como se muestra en la Figura 24.

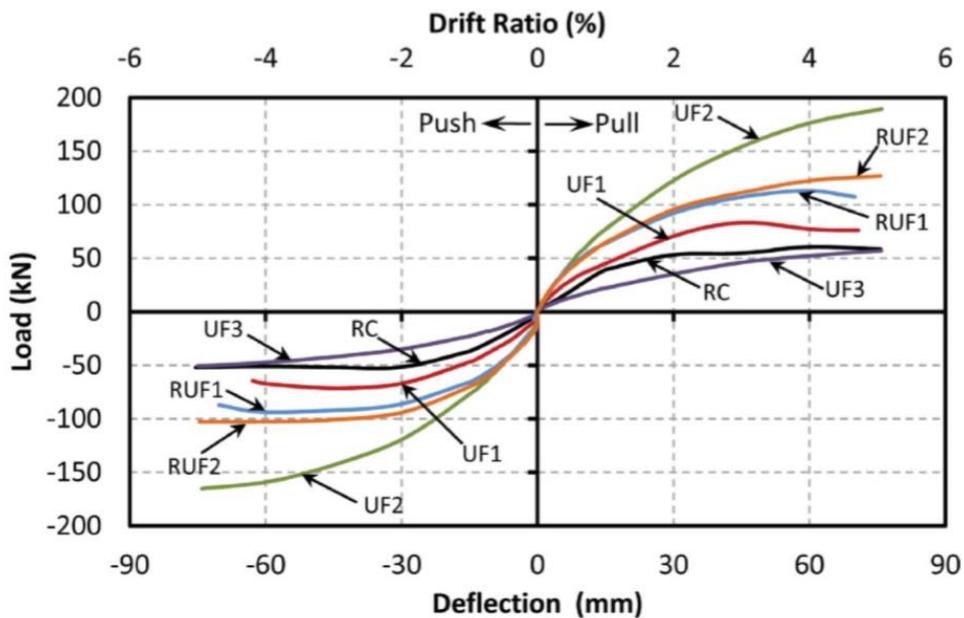


Figura 23. Curva de desempeño "PUSHOVER".  
Fuente: Mirmiran y Zohevrant 2013

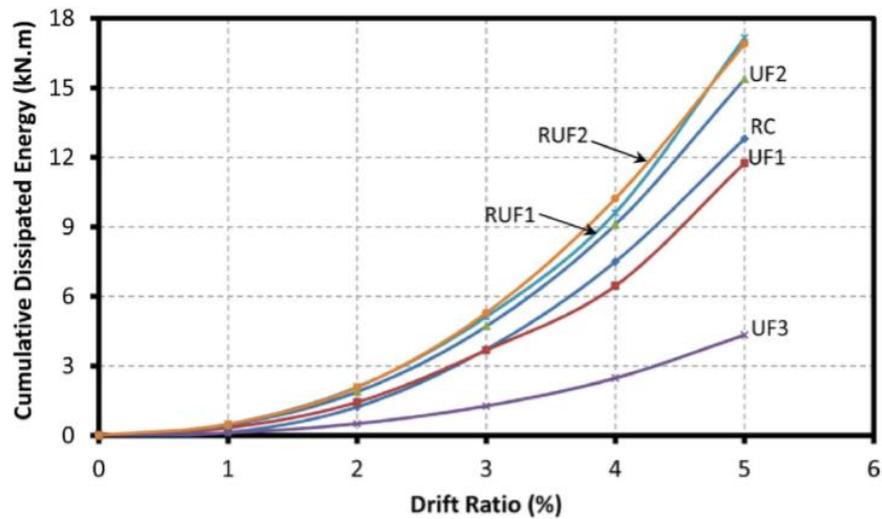


Figura 24. Capacidad de disipación de energía acumulada vs porcentaje de deriva.  
Fuente: Mirmiran y Zohevrاند 2013

Tabla 2. Medidas de desempeño de columnas ensayadas en el la investigación.  
Fuente: Mirmiran y Zohevrاند 2013

Especímen	Dirección	RC	UF1	UF2	UF3	RUF1	RUF2
Rigidez inicial, k (N.m)	Carga	2,613	3,513	5,073	1,484	4,472	4,307
	Descarga	2,472	3,169	5,281	1,540	4,281	4,865
	Promedio	2,542	3,341	5,177	1,512	4,377	4,586
Carga máxima (kN)	Carga	60.5	83.1	189.3	57.1	113	126.8
	Descarga	52	71.3	165.2	50.8	93.6	102.6
	Promedio	56.3	77.2	177.3	54	103.3	114.7
Deflexión máxima (mm)	Carga	75.7	70.8	76	75.8	70	75.7
	Descarga	75.4	62.8	74.1	74.9	70.3	74.6
	Promedio	75.6	66.8	75	75.4	70.2	75.1
Carga de fluencia, Fy (kN)	Carga	55.3	74	159.9	47.4	100.6	118.8
	Descarga	51.1	68.2	143.7	42.9	88.4	100.6
	Promedio	53.2	71.1	151.8	45.1	94.5	109.7
Desplazamiento de fluencia (mm)	Carga	21.2	21.1	31.5	31.9	22.5	27.6
	Descarga	20.7	21.5	27.2	27.8	20.6	20.7
	Promedio	21	21.3	29.4	29.9	21.6	24.2
Ductilidad, $\mu$	Carga	3.6	3.4	2.4	2.4	3.1	2.7
	Descarga	3.7	2.9	2.7	2.7	3.4	3.6
	Promedio	3.65	3.15	2.55	2.55	3.25	3.15

Para el año 2015, se publica un artículo titulado “Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la

aplicación de cargas cíclicas” (Ruiz et al. 2015). Esta investigación se desarrolló con base en el desempeño de vigas de concreto convencional (CC) y vigas de concreto convencional adicionadas con fibras (CF1 Y CF2) en voladizo sometidas a cargas pseudo dinámicas haciendo una variación de la dosificación de las fibras. En esta investigación se calcularon los ciclos de histéresis de los elementos de concreto reforzado ensayados evaluando la energía disipada en cada ciclo para diferentes niveles de deriva alcanzado como se muestra en la Figura 18. Se logró identificar que el desempeño de la mezcla CF2 (30 kg/m<sup>3</sup>) fue superior al de CF1 (15 kg/m<sup>3</sup>) y al de CC. La alta capacidad para disipar energía, con respecto a las otras mezclas, empieza a ser notorio a partir de desplazamientos cercanos a los 30 mm. Estos especímenes con adición de 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras metálicas, alcanzaron niveles de disipación de energía promedio a los 60 mm de 911 J, lo cual deja en evidencia que las fibras metálicas mejoran el comportamiento de los elementos estructurales sometidos a cargas cíclicas (ver Figura 25).

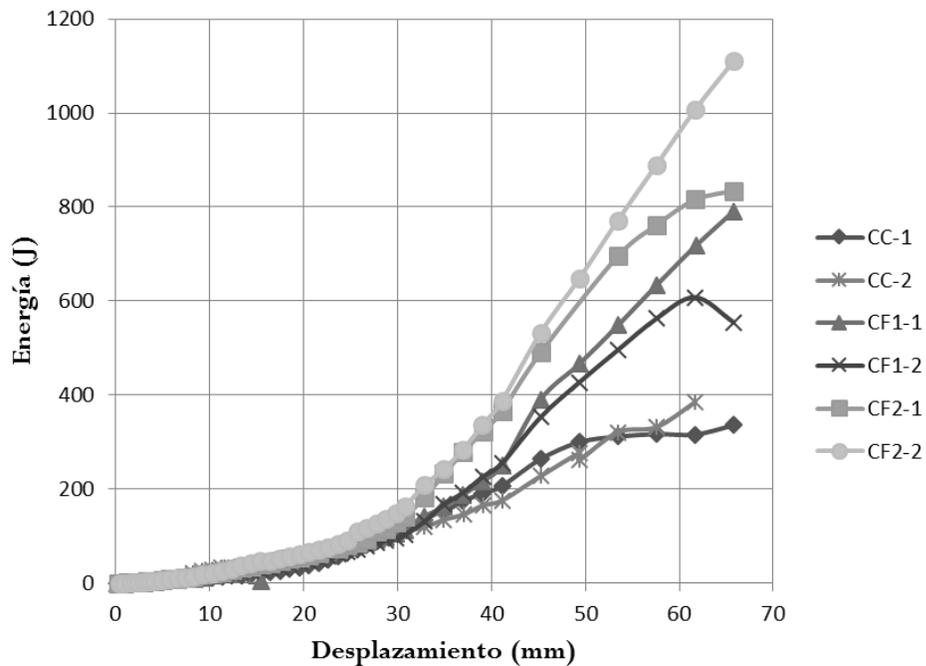


Figura 25. Energía disipada vs Desplazamiento.  
Fuente: Ruiz et al, 2015.

## 2.2.4. FISURACIÓN EN UHPC

Graybeal estableció que la interacción de la fibra de refuerzo y la matriz de UHPC permite pequeñas aberturas para que se produzcan grietas, además permite que el UHPC pueda tener cargas a tracción después de la fisuración (ver Figura 26). Esto resulta ser significativo para la capacidad de ductilidad y el patrón de fisuración que serán las variables que van a ser evaluados en la presente investigación (Graybeal 2008, 602-610).

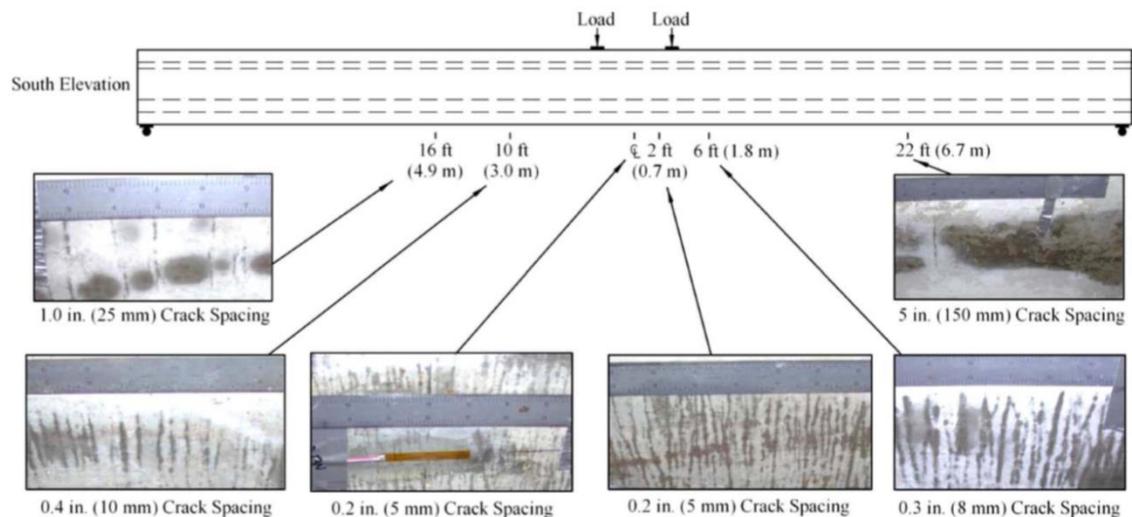


Figura 26. La separación de las fisuras en el alma de la viga I de UHPC.  
Fuente: Graybeal 2008.

En el 2015, se evaluó la significación de la cantidad promedio de fisuras con respecto a diferentes porcentajes de fibras de diferentes longitudes y el patrón de fisuración (ver Figura 27a y 27b). La separación promedio entre las fisuras disminuyó por vigas de UHPC de acuerdo a la incorporación de fibras corta 8 mm (0,31 pulgadas) en comparación con fibras que en las viga fabricadas con fibras

largas de 16 mm (0,62 pulgadas) como se muestra en la Figura 28 (Abbas, Soliman y Nehdi 2015).

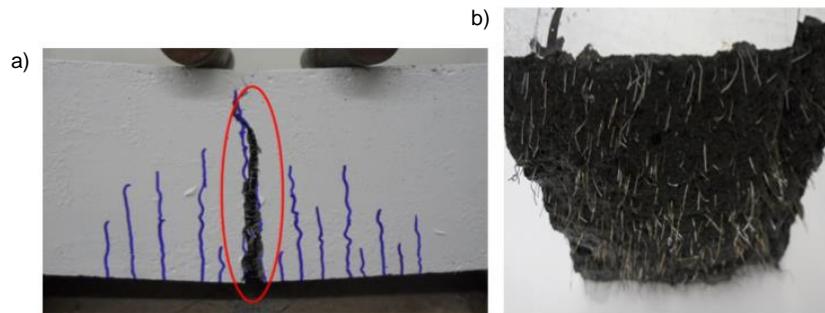


Figura 27. a) Localización de la mayor fisura donde hubo la mayor concentración de esfuerzos en vigas de UHPC b) Superficie de la falla.  
Fuente: Abbas, Soliman y Nehdi 2015.

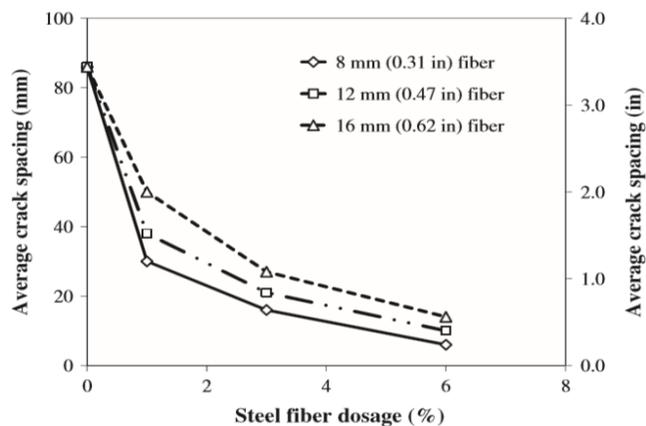


Figura 28. Relación de promedio de fisuración con respecto a la dosificación de UHPC.  
Fuente: Abbas, Soliman y Nehdi 2015.

Una tendencia similar se observó en la disminución del espacio promedio entre fisuras en la dosis más alta de fibra en comparación con la fibra de dosis baja. La inspección visual de las superficies de rotura de vigas (Figura 27b) de UHPC reveló que la fibra larga fue dominante en la fisuración de la falla en comparación

con la fibra corta. Esto confirma que la fibra larga en el UHPC aumenta la capacidad para transferir las tensiones a través de las fisuras y logra una mayor dureza.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se ha establecido una metodología para la evaluación del potencial de capacidad de disipación de energía de vigas en voladizo con UHPC sometidas a cargas cíclicas con el fin de iniciar una línea de investigación de nuevos materiales utilizados en la construcción de estructuras para aumentar la resistencia ante acciones sísmicas. Se ha desarrollado una metodología de acuerdo a cada uno de los objetivos específicos la cual se muestra en la Figura 29.

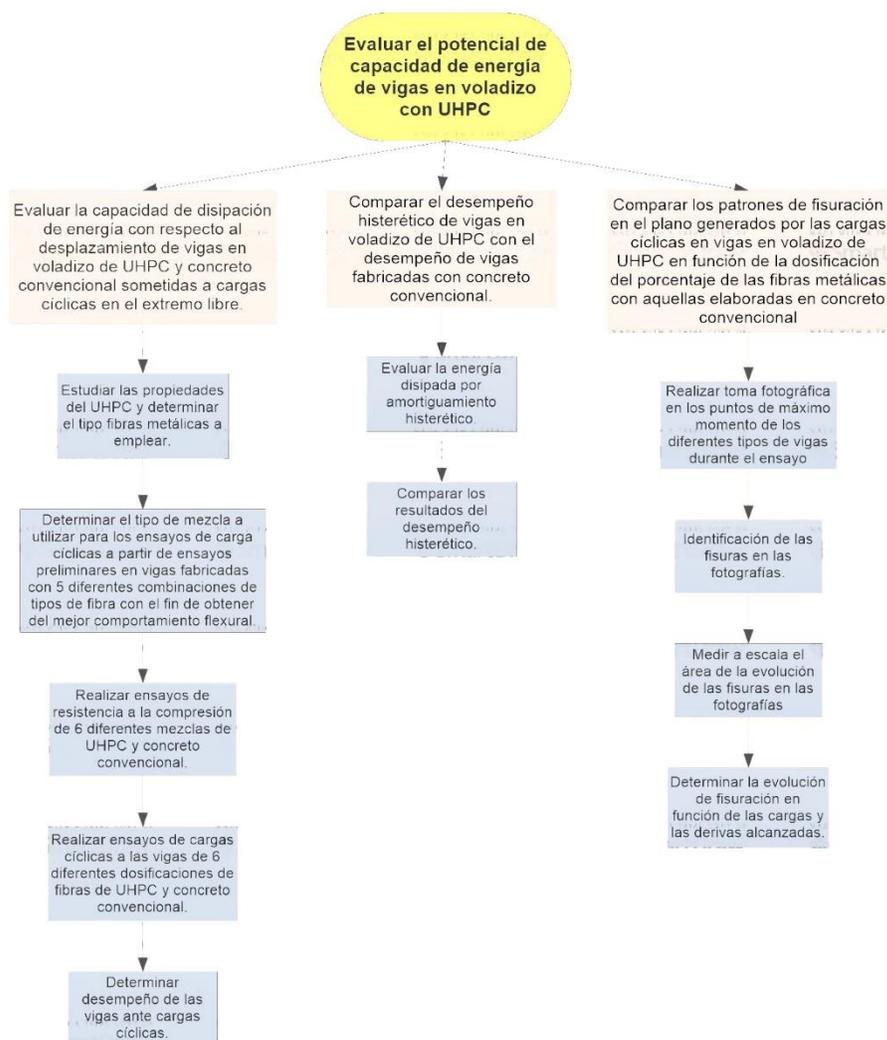


Figura 29. Diagrama de las actividades a desarrollar para cumplir los objetivos.

### **3.1. EQUIPOS Y MATERIALES**

- Balanza

Equipo marca Lexus modelo WA15-30, usado para la dosificación de los materiales según la mezcla a fabricar. Su unidad de medida es el gramo (g).

- Mezcladora

Mezcladora de 25 litros.

- Mesa vibratoria

Para conseguir que la mezcla fuera uniforme, se utilizó la mesa vibratoria a una frecuencia de 1 Hz, la cual homogenizó la mezcla.

- Máquina universal

A través de la máquina universal SHIMADZU que tiene como componente principal una prensa hidráulica, se realizaron los ensayos de resistencia a flexión de las vigas de UHPC.

- Transformador diferencial de variación lineal

Para medir los desplazamientos debidos a la carga, se utilizaron transformadores LVDT por sus siglas en ingles. Los cuales por medio de una corriente eléctrica determinan desplazamientos.

- Mezcladora planetaria

Para la mezcla del UHPC se utilizó una mezcladora Domat MP-0100, con capacidad para 150 litros y de 5.5 Hp de potencia que generan 25 revoluciones por minuto.

- Arena sílicea

En este caso, se seleccionó una fuente de arena sílicea (Figura 30 y 31) seleccionada procedente de la planta MINAGAR, en el municipio de Zipaquirá Cundinamarca, en esta planta proveen la arena a utilizar con la característica granulométrica (suministrada por el proveedor).



Figura 30. Arena Silícea.



Figura 31. Granulometría arena MINGAR Zipaquirá (Cundinamarca).

Adicional a la caracterización granulométrica se caracterizaron algunas de las propiedades de dicha arena tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización arena.

Ensayo	Resultado
Gravedad Específica Bulk	2.44 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad Específica Bulk saturada superficialmente seca	2.45 g/cm <sup>3</sup>
Gravedad específica aparente	2.45 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	0.56%
Masa unitaria suelta	1.30 g/cm <sup>3</sup>
Masa unitaria vibrada	1.50 g/cm <sup>3</sup>

- Cemento Argos

Para este estudio se utilizó un tipo de cemento producido por Cementos Argos llamado “Cemento concretero Rio Claro” (ver Figura 32).



Figura 32. Cemento Río Claro.

Dentro de la caracterización realizada al cemento Rio Claro se realizaron los ensayos que se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Caracterización cemento Rio Claro.

Ensayo	Resultado
Densidad	3.09 g/cm <sup>3</sup>
Finura	4971 cm <sup>2</sup> /g
Relación agua/cemento para una consistencia normal	0.281

- Carbonato de Calcio

Es el producto mineral de color blanco (Figura 33) obtenido por la molienda de calizas extremadamente puras. Por medio de estas adiciones minerales de extrema finura y químicamente reactivos, se logran llenar los micros vacíos del empaquetamiento granular conformado por agregados y cemento, mejorando la compacidad del material y a la vez, las propiedades de la mezcla fresca. Entonces, la cantidad de agua necesaria puede ser reducida mejorando la resistencia del concreto. Por otra parte, estas adiciones reaccionan a mediano y largo plazo con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento Portland, dando como resultado compuestos de mucha mayor resistencia (Espinoza, 2010, 12-13).



Figura 33. Carbonato de calcio.

Para esta investigación se utilizó carbonato de calcio tipo Betocarb que se utiliza especialmente en la fabricación de concretos y productos finales fabricados en concreto.

Este material optimiza la relación agua-cemento, es un plastificante mineral, sirve para el desarrollo de concretos fluidos y autocompactantes, mejora la estética de productos terminados y contribuye a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. Su granulometría se presenta en la Figura 34 (suministrada por el proveedor).

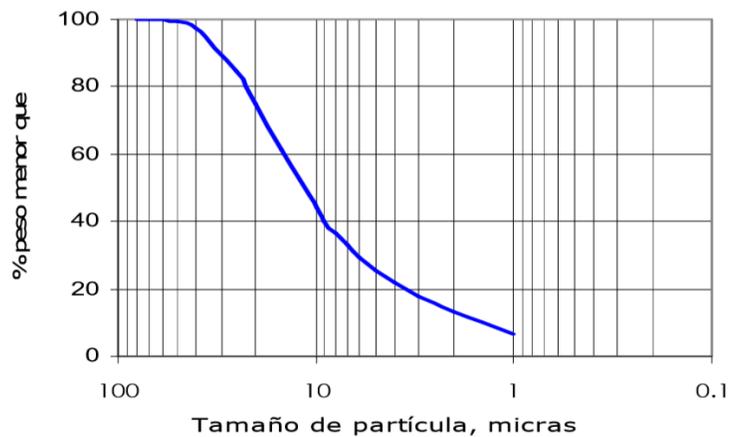


Figura 34. Granulometría de Betocarb.  
Fuente: Omya Andina S.A.

- Humo de sílice

Se decide usar microsíllica comercializada que tiene por nombre EUCON MSA. Dentro de la descripción que se encuentra en la ficha técnica del producto se tiene que es un aditivo en polvo, color gris (ver Figura 35) que adicionado al concreto le otorga características de alta resistencia mecánica y química. Éste reacciona con el hidróxido de calcio en la pasta de cemento, produciendo mayor cantidad de gel de silicato de calcio, incrementando las resistencias y durabilidad. Las partículas

muy finas de microsílca llenan los pequeños espacios entre las partículas de cemento creando un concreto más denso y menos permeable.

La densidad del humo de sílice se encuentra alrededor de los  $2.01 \text{ g/cm}^3$ .

La granulometría del humo de sílice se puede observar en la Figura 36.



Figura 35. Humo de sílice EUCON MSA.



Figura 36. Granulometría humo de sílice TOXEMENT EUCON MSA.

- Reductor de agua de alto rango

Como aditivo reductor de alto rango se decidió el empleo del aditivo Glenium C355+ comercializado por BASF de acuerdo a la bibliografía revisada. El aditivo Glenium consiste en un aditivo hiperplastificante reductor de agua de alto rango basado éteres policarboxílicos modificados.

- Fibras metálicas

Las fibras metálicas son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al concreto con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de concreto en estado fresco empleando metodologías de mezclado tradicionales (Espinoza, 2010, 14-15).

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del concreto.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del concreto.

La fibra metálica, es una fibra desarrollada para mejorar la durabilidad y las propiedades mecánicas del concreto. Aumenta la resistencia a la flexión, la ductilidad, la resistencia a la fatiga, al impacto y aumenta la ductilidad que las fibras generan en la matriz cementicia (Espinoza 2010, 14-15).

Según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas, cortadas en láminas, extraídas por rascado en caliente (virutas de acero) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas). La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el concreto y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc (BEKAERT 2015).

A igualdad de longitud, fibras de pequeño diámetro aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras (BEKAERT 2015). El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina permitiendo una mejor redistribución de la carga o de los esfuerzos.

En este proyecto se utilizaron dos tipos de fibra en busca de encontrar compuestos híbridos con desempeño en resistencias altas pero también con ductilidad elevada.

Los productos a utilizar son fibras DRAMIX OL 13/0.2 y DRAMIX 60/80.

Las fibras DRAMIX 3D (Figura 37) son un tipo de fibras desarrollado por BEKAERT. A continuación en la Tabla 5 se establecen las propiedades de la fibra:

Tabla 5. Propiedades de la fibra DRAMIX 3D.  
Fuente: www.bekaert.com

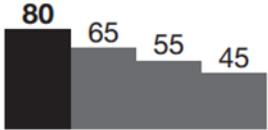
<b>Propiedades del material</b>	
Unión	Encoladas
Revestimiento	Acero gris
Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	1225
Efecto sobre la consistencia (s)	8
Efecto sobre la resistencia del concreto (kg/m <sup>3</sup> )	10
Liberación de sustancias peligrosas	NO
Durabilidad	NPD (Ningún rendimiento determinado)
Módulo de elasticidad (GPa)	210



Figura 37. Fibra DRAMIX 3D.

Asimismo, se presenta la geometría de la fibra DRAMIX 3D en la Tabla 6:

Tabla 6. Geometría de las fibras DRAMIX 3D.  
Fuente: www.bekaert.com

Geometría		
Tipo de fibras	Terminación en gancho 3D	
Longitud	60 mm	
Diámetro	0.75 mm	
Proporción	80	

Dentro de las ventajas de las fibras DRAMIX 3D está la mayor facilidad de mezclar con el concreto puesto que no se forman pelotas o erizos, se puede dosificar en cantidades  $>30 \text{ kg/m}^3$ , asimismo presentan una mejor distribución dentro de la matriz del concreto.

Las fibras encoladas se incorporan fácilmente al concreto de manera homogénea y tixotrópica al ser de diámetros más finos hay más fibras por kg, que permiten una menor distancia entre fibras dentro de la red virtual que se forma en la matriz del concreto y así una menor dispersión dentro del mismo.

Las fibras DRAMIX® OL 13/.20 (Figura 38) son un tipo de fibras también desarrolladas por BEKAERT que comprende fibras de acero, elaboradas de alambre trefilado en frío, para usos estructurales en concreto, mortero y lechada. A continuación en la Tabla 7 se establecen las propiedades de la fibra:

Tabla 7. Propiedades de la fibra corta.  
Fuente: [www.bekaert.com](http://www.bekaert.com)

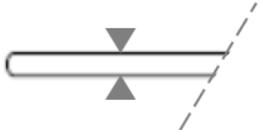
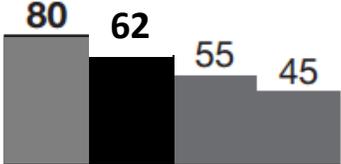
<b>Propiedades del material</b>	
Unión	Sueltas
Revestimiento	NO
Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	2750
Efecto sobre la consistencia (s)	10
Efecto sobre la resistencia del concreto (kg/m <sup>3</sup> )	60
Liberación de sustancias peligrosas	NO
Durabilidad	NPD (Ningún rendimiento determinado)
Módulo de elasticidad (GPa)	210



Figura 38. Fibra DRAMIX OL 13/0.20.

Asimismo, se presenta la geometría de la fibra DRAMIX OL en la Tabla 8:

Tabla 8. Geometría de las fibras DRAMIX OL.  
Fuente: [www.bekaert.com](http://www.bekaert.com)

		Geometría
Tipo de fibra	Recta	
Longitud	13 mm	
Diámetro	0.21 mm	
Proporción	62	

Las fibras sueltas, en dosificaciones superiores a  $30 \text{ kg/m}^3$  tienden a formar erizos, y a tener una alta dispersión de fibras. Es por ello que para esta investigación se decidió estudiar la combinación de ambos tipos de fibra (encoladas y sueltas).

Las fibras de acero se comportan como “puntos de sutura” dentro del concreto, impidiendo así la propagación de las fisuras hacia su interior y retardando el colapso (BEKAERT, 2015).

### **3.2. ENSAYOS PRELIMINARES**

Con base en la revisión bibliográfica de los artículos publicados por los asesores y algunos publicados en el 2015, se decidió realizar ensayos preliminares, para determinar la caracterización del material en términos de las propiedades mecánicas, además de determinar qué tipo de combinación de fibras sería la mejor a utilizar en los ensayos a cargas cíclicas. Para esto se predefinieron 5 tipos de combinaciones a ensayar en viguetas de 10cm x 10cm x 35cm con dosificación al 2% de contenido de fibras metálicas, teniendo que las combinaciones de tipos de fibras son:

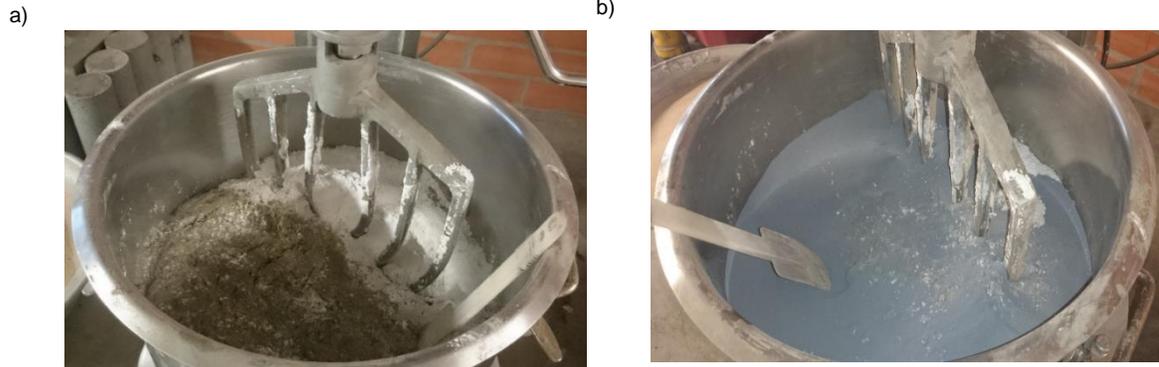
1. 100% Fibras Largas (100 FL).
2. 100% Fibras cortas de 13 mm (100 FC).
3. 50% FC-50% FL (50-50).
4. 70% FC-30% FL (70FC-30FL).
5. 70% FL-30% FC (70FL-30FC).

#### **3.2.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DE LAS VIGUETAS**

La construcción y los ensayos de las vigas, se realizaron teniendo en cuenta el siguiente procedimiento:

1. El volumen de mezclado se calculó para 5 vigas por cada combinación de fibras metálicas y la dosificación de estas fue al 2% sobre el volumen de concreto puesto que esta dosificación es la más utilizada en campo.
2. Se pesaron los materiales.

3. Durante 1 minuto se mezcló en seco los materiales cementantes (Figura 39a y 39b).



*Figura 39. a) Cemento y Carbonato de calcio. b) Humo de sílice*

4. Se agregó el 80% de agua y se mezcló durante 3 minutos hasta que se comenzaron a visualizar esferas dentro la mezcla (Figura 40). Luego se adicionó el 20% restante de agua junto con el 100% del aditivo hasta que la mezcla comenzó a tener consistencia.



*Figura 40. Esferas en el proceso de fundición del concreto.*

5. Una vez obtenido el punto de fluidez, se agregó el 50% de la arena de sílice (ver Figura 41a) y luego de 1 minuto se adiciona el 50% restante. Luego de 5 minutos de mezclado, se adiciona la fibra metálica (ver Figura 41b) y se mezcló durante 4 minutos.

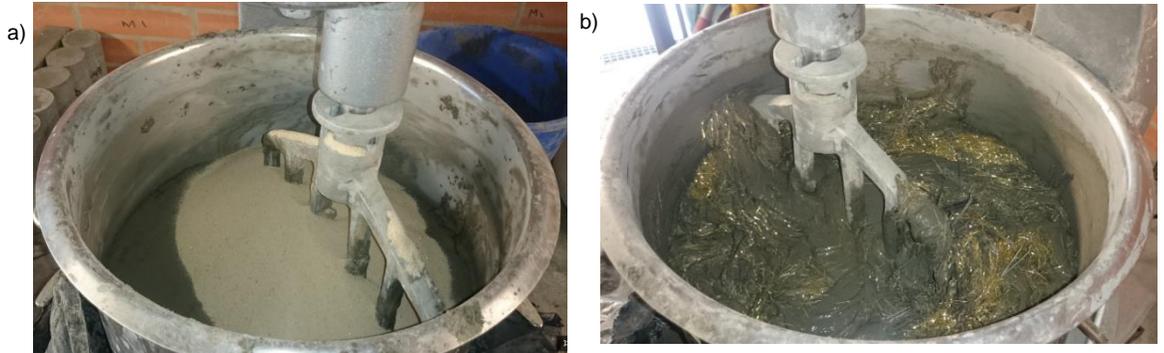


Figura 41. a) Arena sílicea. b) Fibras metálicas

6. Luego de que la mezcla estuvo lista se vació el concreto en la formaleta metálica (Figura 42a) y se compactó con ayuda de la mesa vibratoria (Figura 42b).

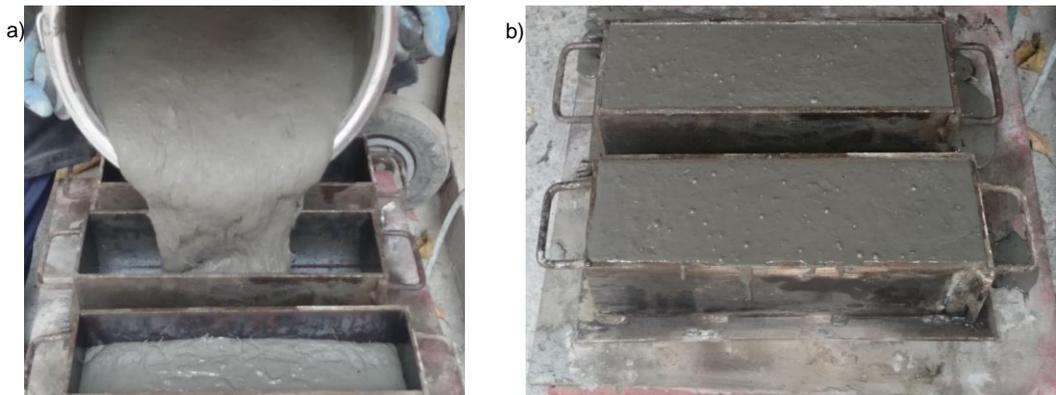


Figura 42. a) Fundida de mezcla. b) Vibrado de mezcla

7. Los especímenes se mantuvieron en el cuarto de curado por un periodo de 31 días antes de los ensayos de resistencia a la flexión (Figura 43).



*Figura 43. Muestras de especímenes preliminares en el cuarto de curado.*

8. Luego de retirar los especímenes del cuarto de curado se tomaron las medidas de cada una de las vigas en los extremos y en el medio según lo establece el procedimiento para los ensayos de resistencia a la flexión de la norma INV E 414-2013 (Figura 44).



*Figura 44. Medición de los especímenes preliminares de acuerdo a la norma INV E 414-2013.*

Posteriormente, se analizó cuál combinación presentaba el mejor comportamiento flexural mediante ensayos en los especímenes preliminares, de acuerdo a la norma INV E 414-2013 utilizando la máquina universal de ensayos SHIMADZU (100 KN) (Figura 45 y Figura 46). De esta manera, se podrá caracterizar el material y evaluar la capacidad de disipación de energía a posteriori en el UHPC con fibras metálicas. Cabe destacar que los resultados del primer espécimen de esta mezcla no se reflejan en la Figura 47 y 48 puesto que, inicialmente los ensayos iban a realizarse en la máquina INSTRON (50 kN). Sin embargo, esta mezcla logró superar el límite máximo de aplicación de la carga, por lo que se tuvo que devolver los especímenes al cuarto de curado y esperar la reprogramación de los ensayos en el laboratorio. A pesar de que el espécimen ya se había fisurado, la vigueta logró alcanzar una carga mayor a 80 kN cuando se ensayó nuevamente. Es decir, después de fisurarse la vigueta y someterla de nuevo al proceso de curado, la mezcla de UHPC tuvo una recuperación significativa que sería importante estudiar en investigaciones futuras.



*Figura 45. Instrumentación para ensayos de resistencia flexural de acuerdo a la norma INV E 414-2013.*



*Figura 46. Preparación de los especímenes preliminares para ensayos de resistencia a la flexión de acuerdo a la norma INV E 414-2013.*

### **3.2.2. COMBINACIÓN DE FIBRAS IDEAL**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de los ensayos de resistencia flexural, realizados en las vigas preliminares (viguetas) para establecer la mejor combinación de fibras metálicas a utilizar de acuerdo a la mayor capacidad de disipación de energía. La capacidad de disipación de energía se calculó por medio del área bajo la curva de Carga-Desplazamiento. Se usó el método de los trapecios para determinar la energía disipada.

#### **3.2.2.1. Combinación 100% fibra larga.**

Para la fibra larga los resultados fueron bastante dispares. Cabe destacar que la manejabilidad de esta mezcla fue bastante pobre, por lo que es difícil garantizar que la mezcla haya sido homogénea en toda la vigueta. Es por esto que la diferencia de los resultados es bastante notoria como se puede observar en la Figura 47 y en la Figura 48.

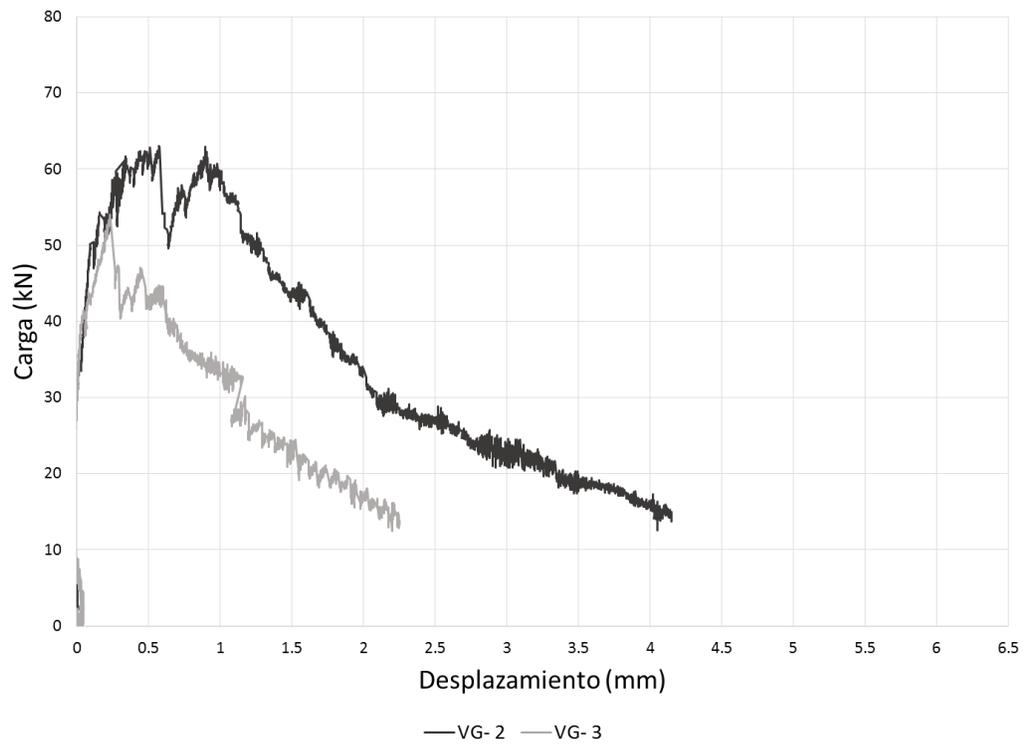


Figura 47 Carga vs Desplazamiento (100% FL)

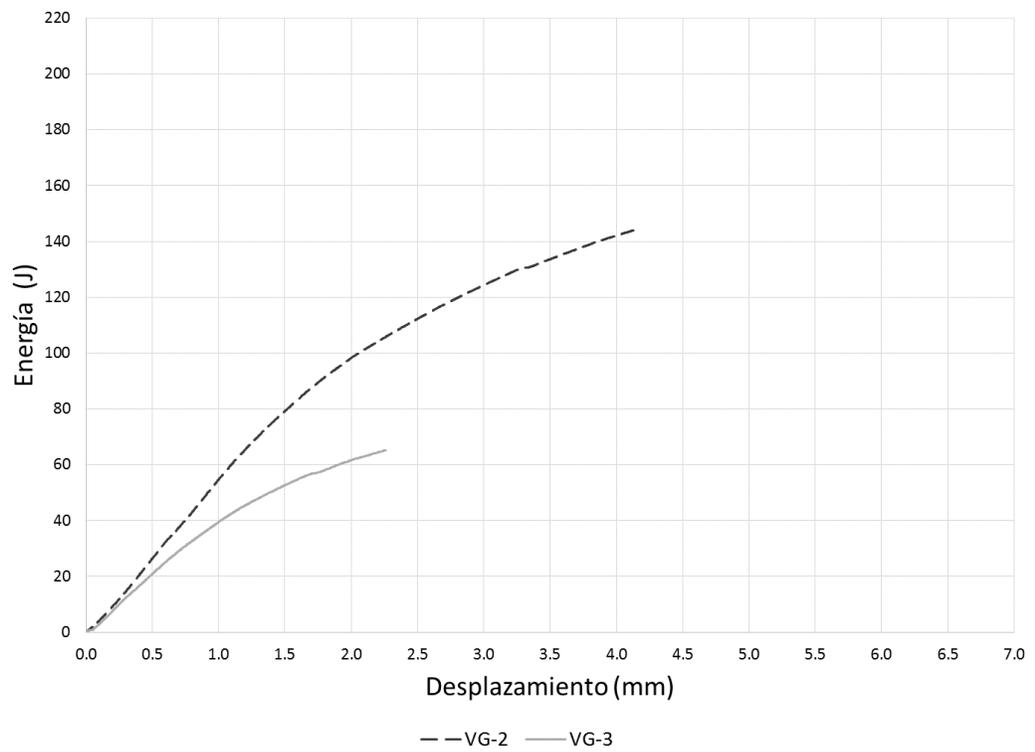


Figura 48. Energía vs Desplazamiento (100 % FL).

### 3.2.2.2. Combinación 50% fibra corta – 50 % fibra larga.

Para esta combinación los resultados fueron bastante similares, siendo la mezcla con menor variabilidad de todas las estudiadas. Además, esta combinación en las tres viguetas lograron alcanzar cargas de al menos 60 kN y deflexiones por encima de los 4 mm como se muestra en la Figura 49.

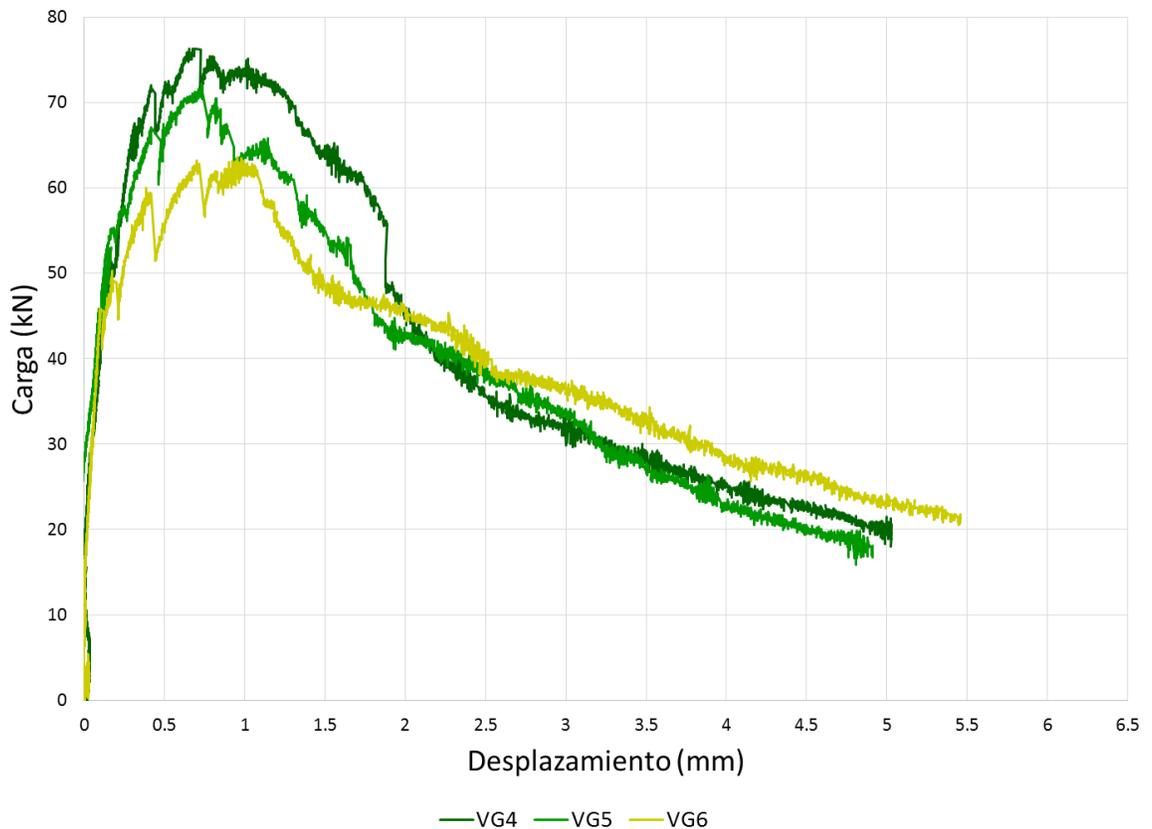


Figura 49 Carga vs Desplazamiento (50% FL – 50% FC).

La energía disipada por esta combinación llegó a superar los 200 Julios y para desplazamientos mayores a 4.5 mm como se puede observar en la Figura 50.

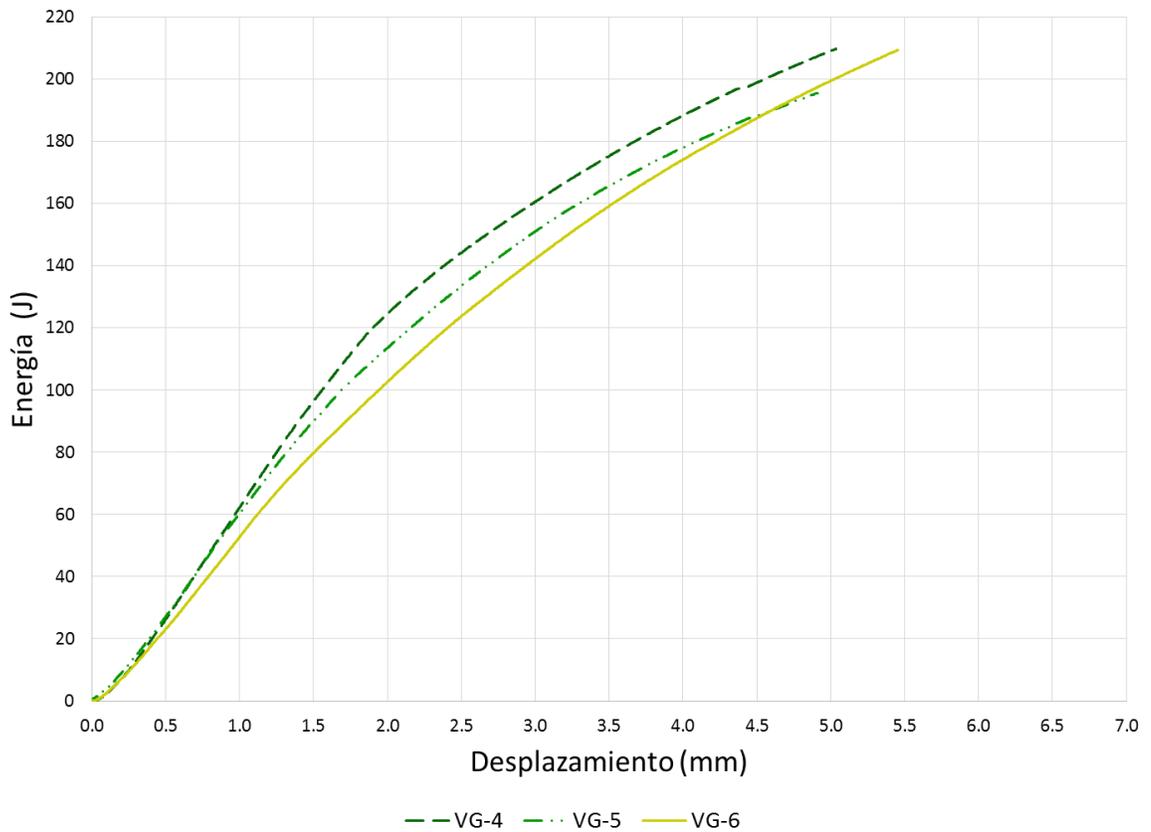
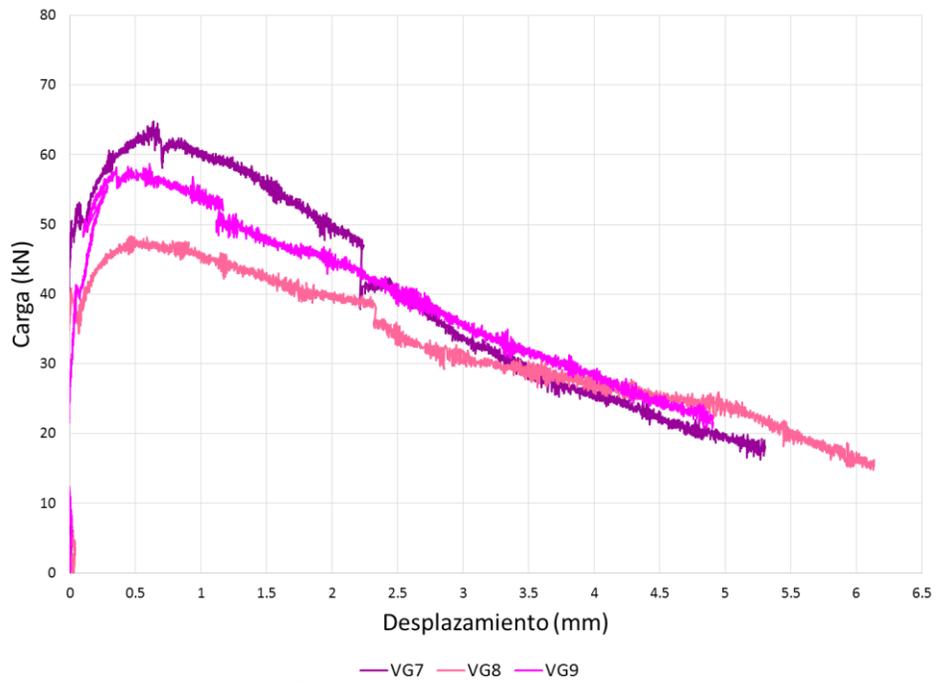


Figura 50 Energía vs Desplazamiento (50% FL – 50% FC).

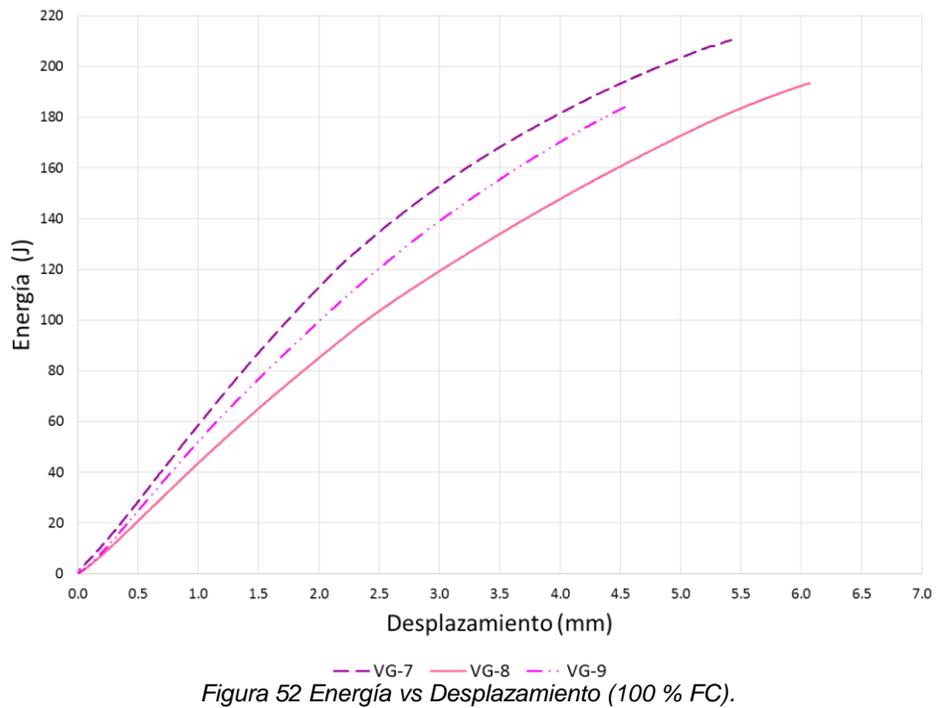
### 3.2.2.3. Combinación 100% fibra Corta.

En esta combinación al igual que en la combinación 50-50 los resultados fueron bastante similares. A diferencia de la combinación 100 FL, esta mezcla a pesar de tener un alto contenido de fibras cortas fue bastante fácil de manejar. Además, esta combinación es la que tiene más aplicación en el ámbito de la construcción.

De esta combinación en las tres viguetas lograron alcanzar cargas de al menos 40 kN y deflexiones por encima de los 4.5 mm como se muestra en la Figura 51.



La energía disipada por esta combinación llegó a superar los 180 Julios y para desplazamientos mayores a 4.5 mm como se puede observar en la Figura 52.



#### 3.2.2.4. Combinación 70% fibra larga – 30% fibra corta.

Para esta combinación los resultados fueron bastante dispares. Cabe destacar que la manejabilidad de esta mezcla fue bastante pobre al igual que la combinación con el 100% de fibra larga, por lo que es difícil garantizar que la mezcla haya sido homogénea en todas las viguetas. Es evidente que cuando existe una gran cantidad de fibras largas, estas bajan la manejabilidad de la mezcla a la hora del vaciado. Es por esto que la diferencia de los resultados es bastante notoria como se puede observar en la Figura 53. De esta combinación en las tres viguetas las cargas alcanzaron al menos 40 kN y deflexiones por encima de los 4.5 mm.

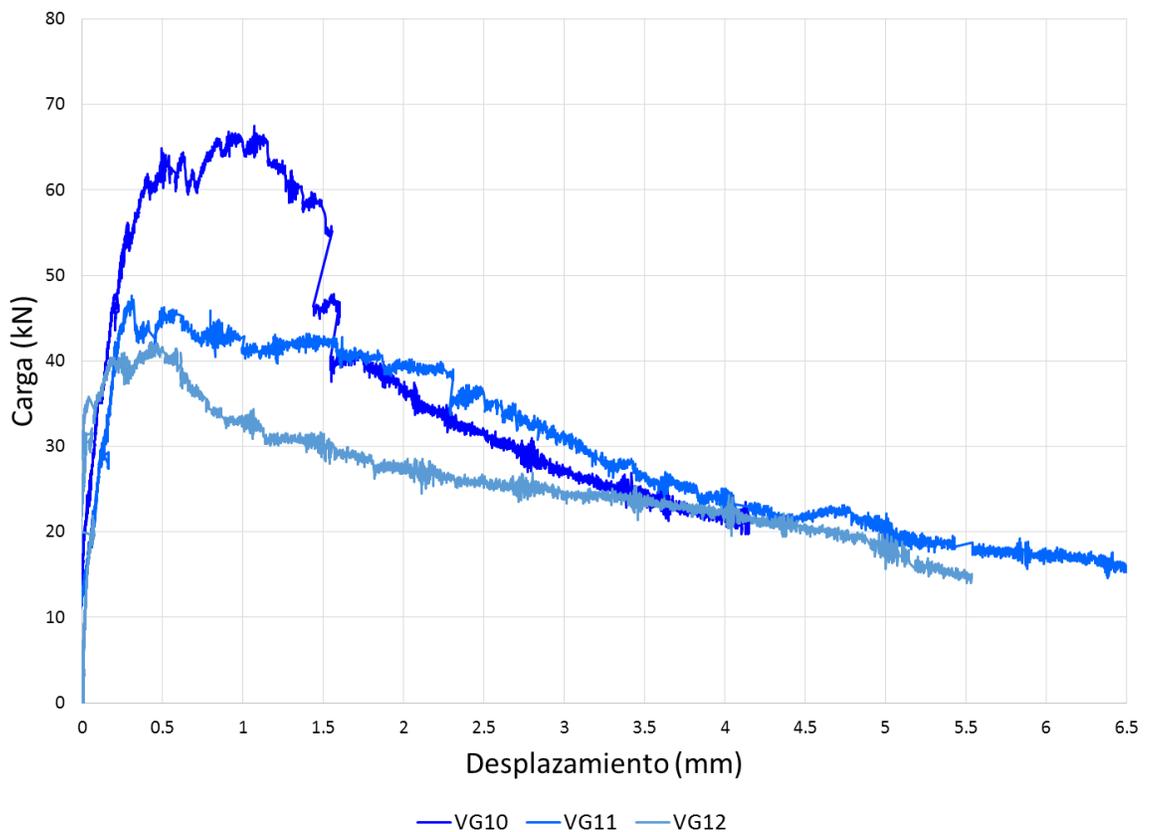


Figura 53. Carga vs Desplazamiento (70% FL – 30% FC).

La energía disipada por esta combinación llegó a superar los 140 Julios y los desplazamientos fueron mayores a 4 mm como se puede observar en la Figura 54.

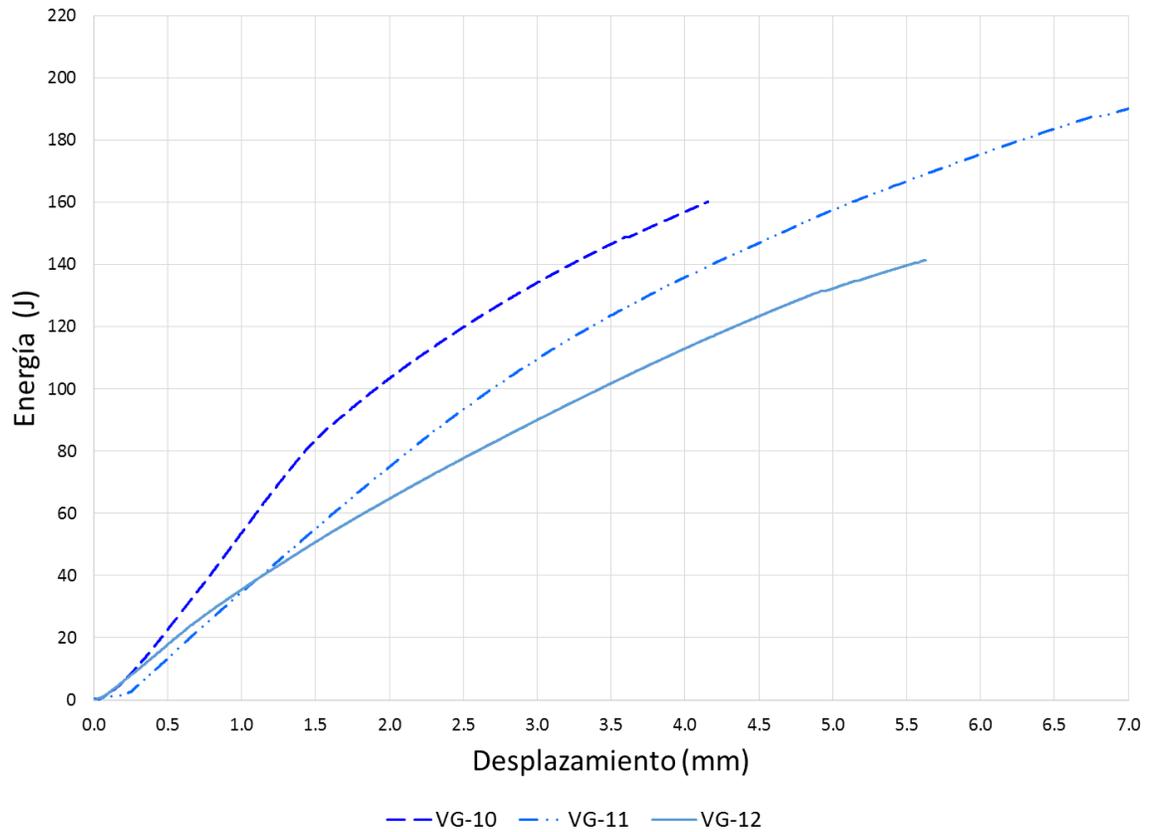


Figura 54 Energía vs Desplazamiento (70% FL – 30% FC).

### 3.2.2.5. Combinación 70% fibra corta – 30% fibra larga.

Para esta combinación los resultados también fueron bastante dispares. Cabe destacar que la manejabilidad de esta mezcla fue buena debido a la gran cantidad de proporción de fibra corta. Sin embargo, es evidente que cuando existe una cantidad desproporcional de diferentes tipos de fibras, la red virtual no estas no garantizan que la distribución de las fibras largas sean uniformes en toda la mezcla a la hora del vaciado. Es por esto que la diferencia de los resultados es evidente

como se puede observar en la Figura 55. De esta combinación en las dos viguetas las cargas alcanzaron al menos 50 kN y deflexiones por encima de los 3 mm.

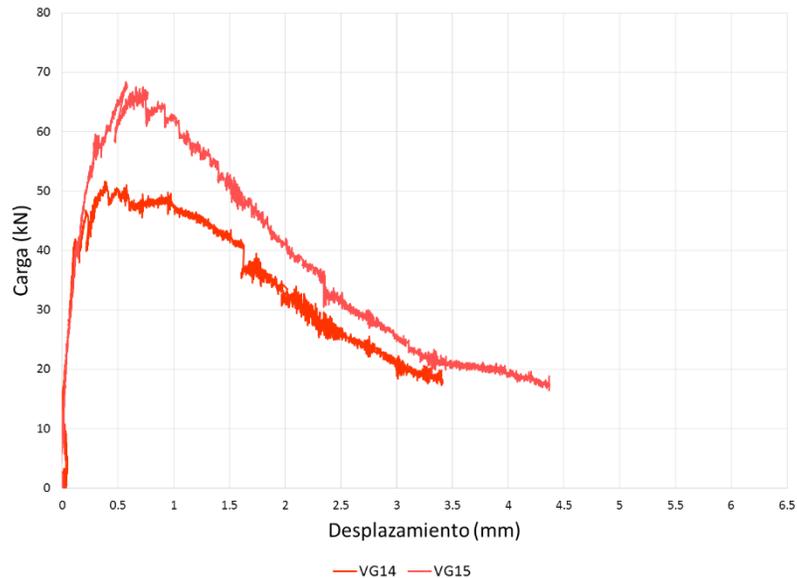


Figura 55 Carga vs Desplazamiento (70% FC – 30% FL).

La energía disipada por esta combinación llegó a superar los 120 Julios y los desplazamientos fueron mayores a 3.5 mm como se puede observar en la Figura 56.

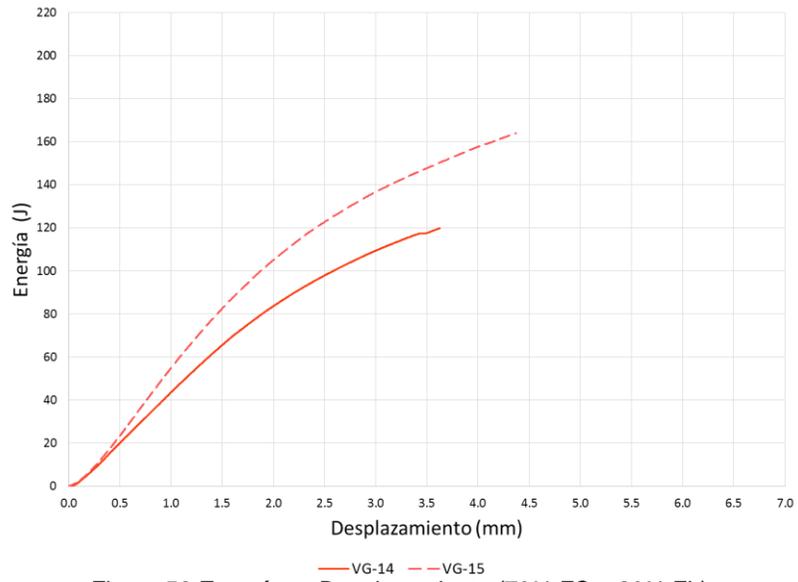


Figura 56 Energía vs Desplazamiento (70% FC – 30% FL).

### 3.2.2.6. Gráfica desplazamiento vs capacidad de disipación de energía en vigas.

Después de obtener los resultados de capacidad de disipación de energía se hizo un promedio el cual se puede mostrar en la Figura 57.

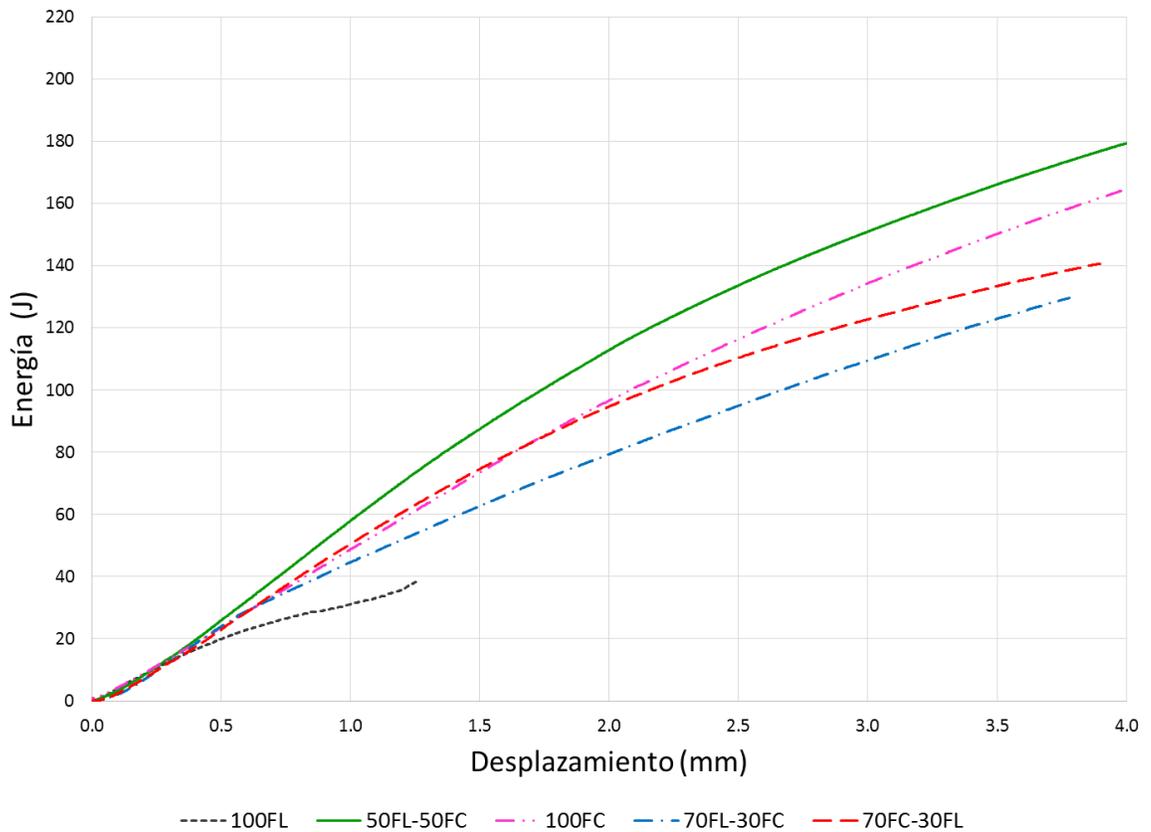


Figura 57. Deflexión vs Capacidad de disipación de energía.

Como se observa en la Figura 57 la combinación de fibras ideal para la mezcla con dos tipos de UHPC es la de 50-50, seguida por la de 100FC, la cual también se tomó en cuenta para los ensayos de cargas cíclicas. Debido a los inconvenientes con el cambio de máquina para realizar los ensayos a flexión en las viguetas es importante resaltar que los resultados obtenidos en esta investigación son comparables solo con ensayos realizados bajo la misma metodología propuesta. Sin embargo, se recomienda siempre y cuando las condiciones técnicas y económicas lo permitan, realizar ensayos a flexión de acuerdo a la norma ASTM C-1609.

### **3.3. PROPORCIONES DE MEZCLAS A ENSAYAR**

Después de obtener la mejor combinación de fibras se procedió al diseño de mezcla de acuerdo a las proporciones las cuales se muestran en la Tabla 9. La primera mezcla (CC) consistirá en un concreto convencional, sin ningún tipo de adición, se elaborarán especímenes con esta mezcla con el fin de realizar comparaciones entre el material convencional y el UHPC. Asimismo se decidió ensayar una mezcla de UHPC sin fibras para comparar la influencia de las fibras un concreto de ultra-alto desempeño con respecto a la capacidad de disipación de energía. Además, cinco mezclas de UHPC (0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 1.5% FC y SF), serán elaboradas con cemento, arena silícea tamaño máximo nominal 600 micras, humo de sílice, carbonato de calcio, aditivo plastificante de alto rango, fibras dramix lisas 13 mm, fibras dramix 3D y agua. Estas mezclas variarán de acuerdo al porcentaje de dosificación de la fibra sobre el volumen total del concreto en 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 1.5% FC (Solo fibra corta) y SF (sin fibras).

*Tabla 9. Diseño de mezcla para CC. 2016.*

<b>Diseño de mezcla para concreto</b>	
<b>Materiales</b>	<b>V(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cemento "Portland"</b>	0.13
<b>Arena</b>	0.34
<b>Grava</b>	0.28
<b>A/C</b>	0.55
<b>Aire</b>	0.0025

Tabla 10. Diseños de mezcla para UHPC.

<b>Diseño de mezcla para UHPC</b>						
<b>Materiales/Tipo de mezcla</b>	<b>SF</b>	<b>0.50%</b>	<b>1%</b>	<b>1.50%</b>	<b>2%</b>	<b>1.5% FC</b>
<b>Cemento "Río Claro"</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Arena silícea</b>	0.96	0.94	0.93	0.91	0.89	0.91
<b>Humo de Sílice</b>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
<b>Carbonato de Calcio</b>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>Aditivo</b>	0.027	0.027	0.03	0.027	0.027	0.027
<b>A/C+C</b>	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
<b>A/C+C+H.S</b>	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18

### **3.4. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

#### **3.4.1. FABRICACIÓN DE LOS CILINDROS**

Se crearon 3 probetas por viga (Figura 58) para posteriormente realizar ensayos a compresión en la máquina IBERTEST (Figura 59), con cilindros de diámetro  $D=10$  cm y altura  $h=20$  cm, para luego analizar los resultados de los parámetros obtenidos y así confirmar que las vigas de UHPC tienen una resistencia a la compresión similar a 150 MPa como lo establece la literatura.



Figura 58. Fabricación de testigos para cada viga.



*Figura 59. Ensayo de resistencia a la compresión.*

### **3.4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron para tres testigos de cada una de las vigas ensayadas. Esto con el objetivo de verificar que las mezclas estuvieran en la capacidad por encima de los 120 MPa de resistencia a la compresión. Además, verificar que el aumento de la resistencia fuera proporcional al aumento de dosificación. Sin embargo, es importante resaltar que el uso de fibras largas aumenta significativamente la resistencia a la compresión como se muestra en Figura 60.

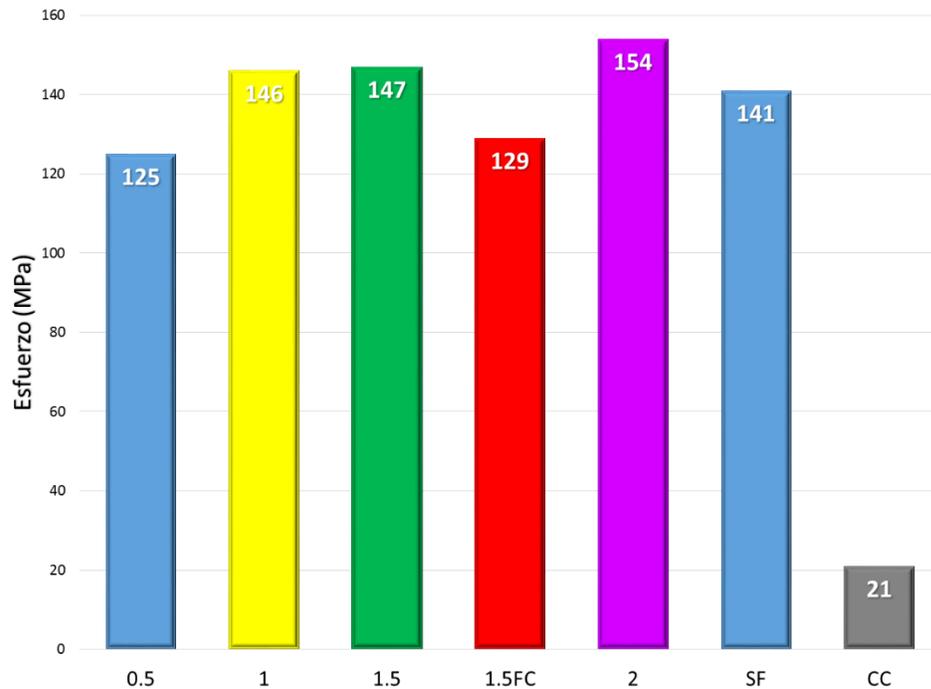


Figura 60. Resistencia a la compresión de las mezclas ensayadas.

Como se evidencia en la Figura 60 los especímenes de UHPC tuvieron una mayor resistencia a la compresión que el de concreto convencional. Observando que el aumento con respecto al concreto convencional es de 638%, 600%, 513%, 594%, 494% y 571% para las dosificaciones de 2%, 1.5%, 1.5% FC, 1%, 0.5% y SF, respectivamente.

Se puede observar que existe un aumento en la resistencia a la compresión en los especímenes que no tienen ningún contenido de fibra, estando incluso por encima de la mezcla del 0.5%. Es importante para investigaciones futuras se investigue acerca de la influencia de la cantidad de arena silícea en la resistencia a la compresión para mezclas de UHPC, puesto que para las mezclas realizadas en esta investigación lo único que cambia es la dosificación de fibras y la cantidad de arena silícea la cual es inversamente proporcional a las fibras. Es decir, que mientras es mayor la cantidad de fibras es menor la cantidad de arena.

## **3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS**

### **3.5.1. DIMENSIONAMIENTO Y DESPIECE**

Se estableció que el elemento a ensayar haría parte de sistema de resistencia sísmica cuyo grado de disipación de energía es moderado (DMO), por lo tanto, según la NSR-10 la sección mínima en vigas es de 0.20 m y en columnas 0.25 m. El despiece se realizó con base en las cuantías mínimas que el reglamento establece para cada elemento (Figura 61).

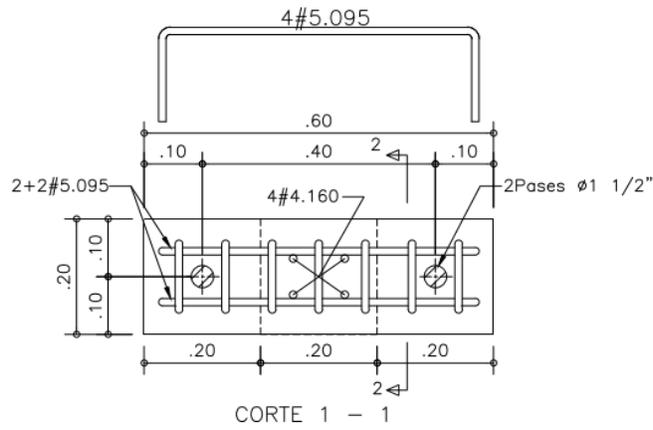
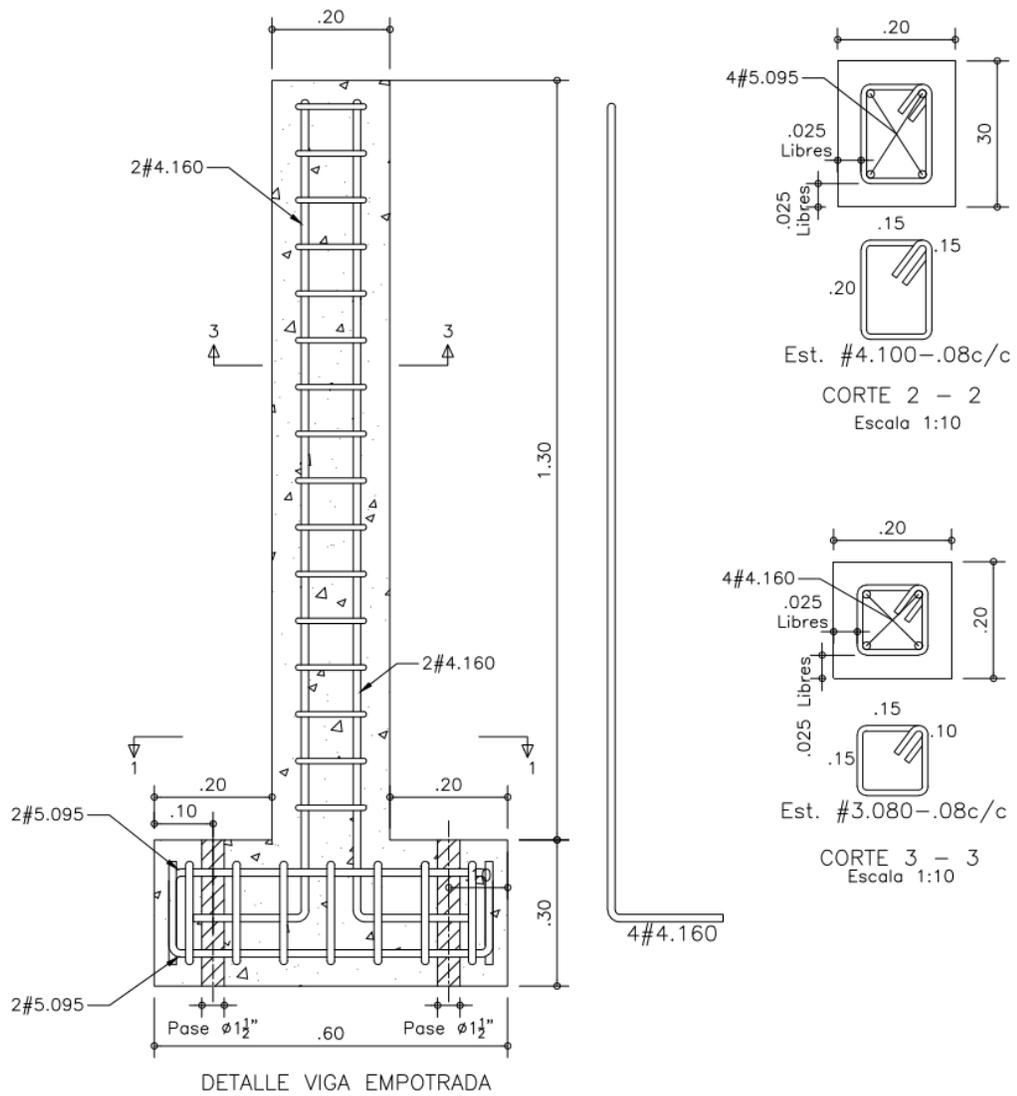


Figura 61. Despiece de viga en voladizo.

### 3.5.2. CONSTRUCCIÓN

La formaleta utilizada para la construcción del sistema viga nudo fue en madera tipo pino como se muestra en las Figuras 62a. Luego se procedió a colocar el armado de acero de refuerzo dentro de la formaleta con sus respectivos pases (Figura 62b y 63). Posteriormente se fabricaron los especímenes de vigas de UHPC realizando el mezclado, moldeado, vaciado, y fraguado a los 28 días para adquirir la máxima resistencia. La fabricación del concreto (Figura 71), se realizó por medio de capas a lo largo del elemento, para asimismo garantizar su homogeneidad. Finalmente, se ejecutó la actividad del curado de los especímenes, rociándoles agua dos veces al día durante los primeros 7 días después de fundidas.

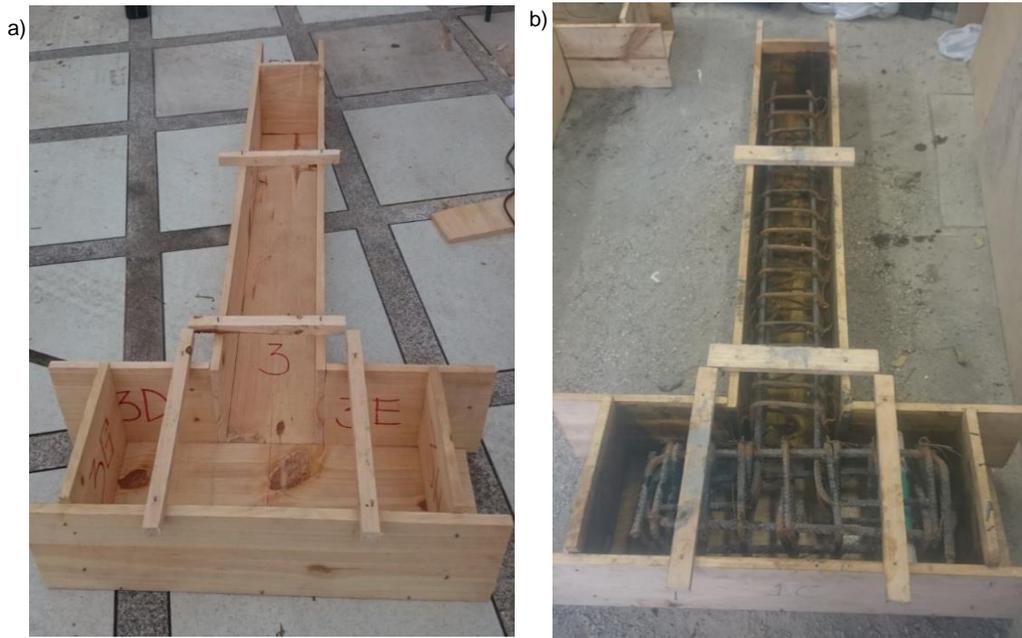


Figura 62. a) Formaleta de vigas en voladizo. b) Armadura dentro de la formaleta



Figura 63. Armado de vigas en voladizo



Figura 64. Fabricación de vigas en voladizo.

### 3.5.3. DISEÑO DE MONTAJE DEL ENSAYO

Para estos ensayos se elaboraron aditamentos (ver Figura 64) los cuales fueron dimensionados teniendo en cuenta las cargas aplicadas a las vigas, considerando la restricción en la base, puesto que era importante que no se desplazara al aplicar las cargas cíclicas en el extremo en voladizo. Para ello se tomó en cuenta condiciones generales del actuador dinámico, es decir su máxima capacidad de carga a aplicar (50 kN) y las reacciones en el marco de reacción. Adicionalmente, se instrumentó cada viga con deformímetros electrónicos tipo LVDT (en la base, a media altura y en la altura total) (ver Figura 65), con el fin de registrar los desplazamientos de las probetas con respecto al tiempo.

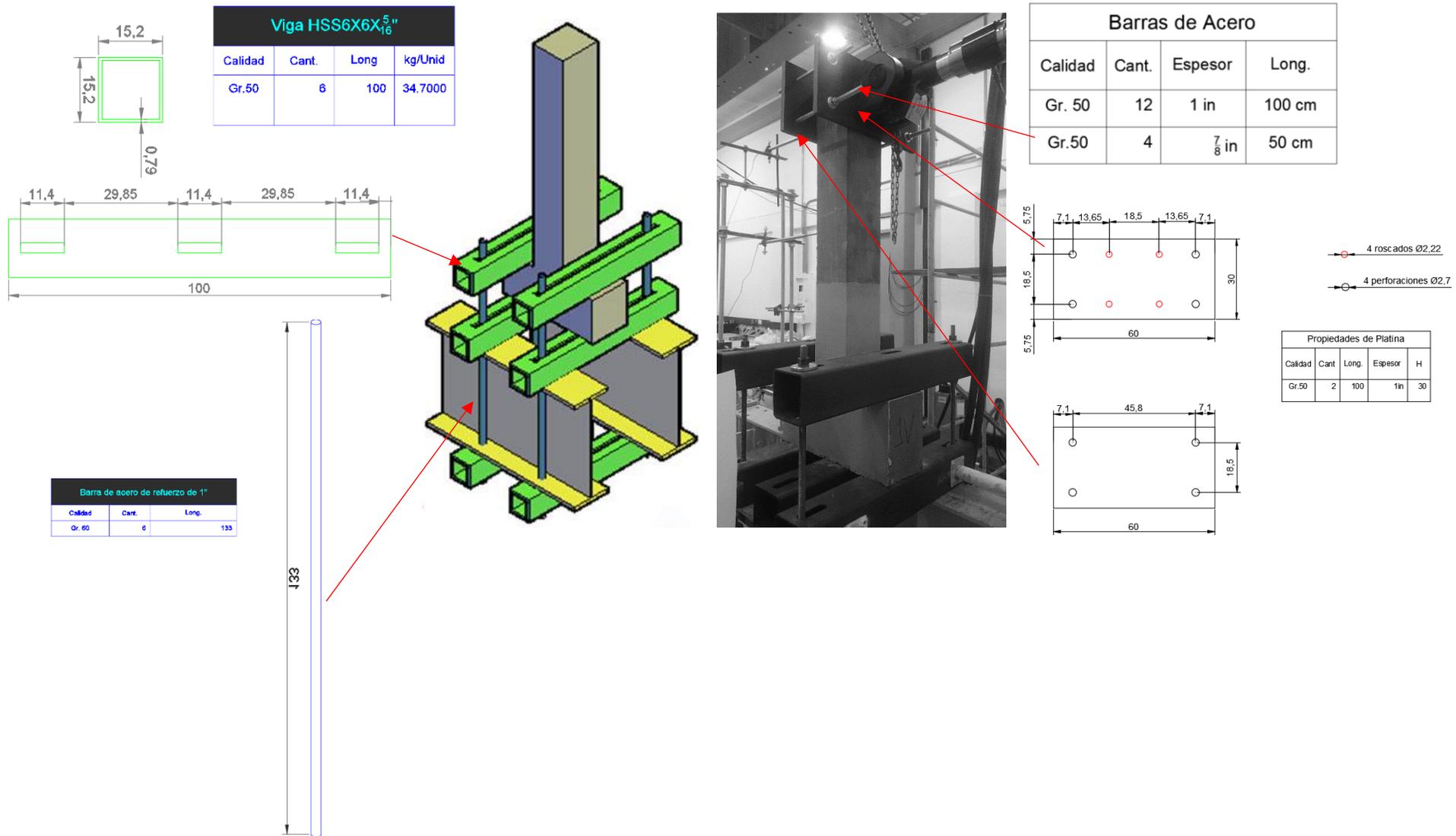


Figura 65. Diseño de aditamentos para el montaje de vigas en voladizo para cargas cíclicas.

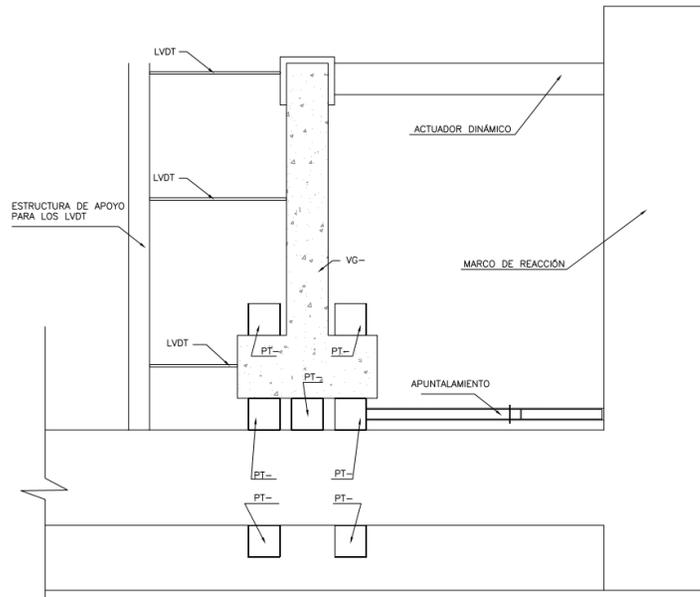
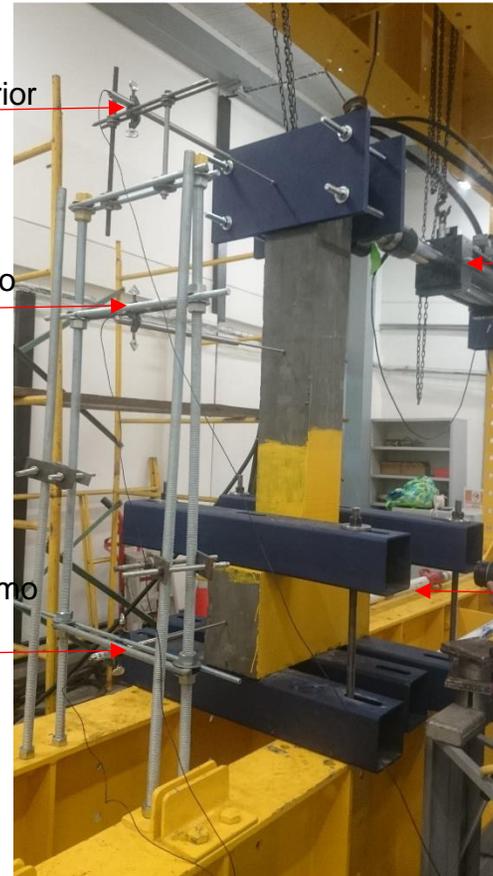


Figura 66. Sistema para ensayo ante cargas cíclicas



LVDT extremo superior

LVDT medio

LVDT extremo inferior

Actuador dinámico

Puntales

Igualmente se aplicaron cargas que a su vez fueron inducidas a través del actuador dinámico a una frecuencia de 3 ciclos de carga-descarga por minuto como se muestra en la Figura 67. Este procedimiento se realizará para las 11 vigas construidas con los diferentes tipos de mezclas, hasta llevarlas a la falla a niveles de deriva cercanos al 6%.

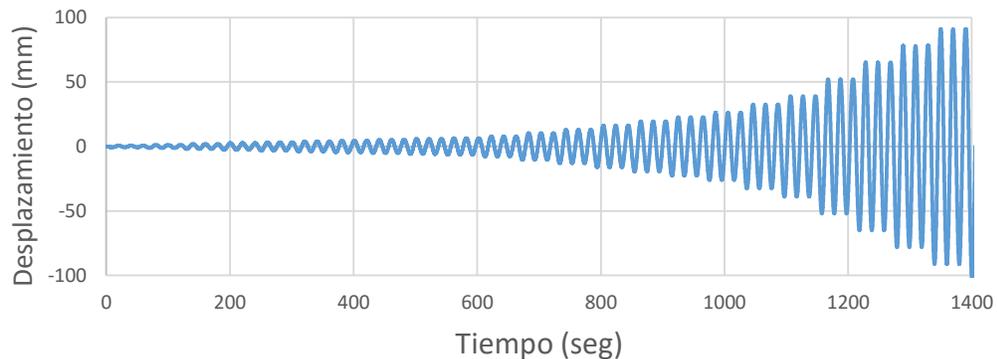


Figura 67. Gráfica de tiempo vs desplazamiento.

### **3.6. ENSAYOS A CARGAS CÍCLICAS**

#### **3.6.1. PROCEDIMIENTO**

Habiendo obtenido la combinación que presentó el mejor comportamiento flexural en los especímenes preliminares de las diferentes combinaciones, se predimensionaron las vigas a ensayar con cargas cíclicas. Dichos especímenes se realizaron con 6 diferentes tipos de dosificaciones, los cuales se diferencian entre sí por el porcentaje de adición de fibras metálicas en relación al volumen total de concreto y una muestra control de concreto convencional como se explicó en el apartado 3.3.

Se realizaron ensayos con desplazamientos controlados en las vigas sometidas a cargas cíclicas en el marco de reacción con el sistema para ensayos sobre materiales y modelos estructurales MTS. Los ensayos consistieron en aplicar una serie de cargas cíclicas sinusoidales con desplazamiento controlado incremental a la parte superior de las vigas en voladizo. Este montaje es similar al de Ganesa N., Indira P. y Abraham R. (2007) aunque para el presente caso se realizarán mayor cantidad de ciclos por nivel de desplazamiento y con mayor cantidad de datos adquiridos; como consecuencia del uso de equipos de mayor tecnología.

Obtenidos los resultados de los ensayos de cargas cíclicas para cada una de las mezclas de concreto (tanto las vigas de UHPC como las vigas de concreto convencional), se realizaron las curvas de histéresis, siguiendo la norma ASTM E2126 de acuerdo a los diagramas de carga-desplazamiento. Se obtuvo la capacidad de ductilidad tomando en cuenta el desplazamiento de fluencia y el desplazamiento máximo alcanzado. Asimismo, la capacidad de disipación de energía, lo cual se realizó mediante un programa con MATLAB versión 7.10.0 (R2010a), utilizando el método del área de los trapecios para cada ciclo mediante los resultados de fuerza y desplazamiento máximo, en cada área de los ciclos de carga y descarga para cada uno de los especímenes.

Para comparar el desempeño histerético de vigas en voladizo de UHPC con el desempeño de vigas fabricadas con concreto convencional. Se evaluará la energía disipada por amortiguamiento histerético. Al realizar las curvas de histéresis y obtener los resultados de fuerza y desplazamiento máximo, capacidad de ductilidad y área de los ciclos de carga y descarga para cada uno de los tipos de vigas de UHPC y concreto convencional ante cargas cíclicas, se podrá obtener la capacidad de disipación de energía de cada una de las vigas y tabular los resultados para comparar el comportamiento de las propiedades mecánicas de todos los especímenes.

### 3.6.2. RESULTADOS PARA DESEMPEÑO HISTERÉTICO

#### 3.6.2.1. Vigas de 0.5% de dosificación de fibras

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las vigas de UHPC con dosificación al 0.5% de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas hasta el 6% de deriva:

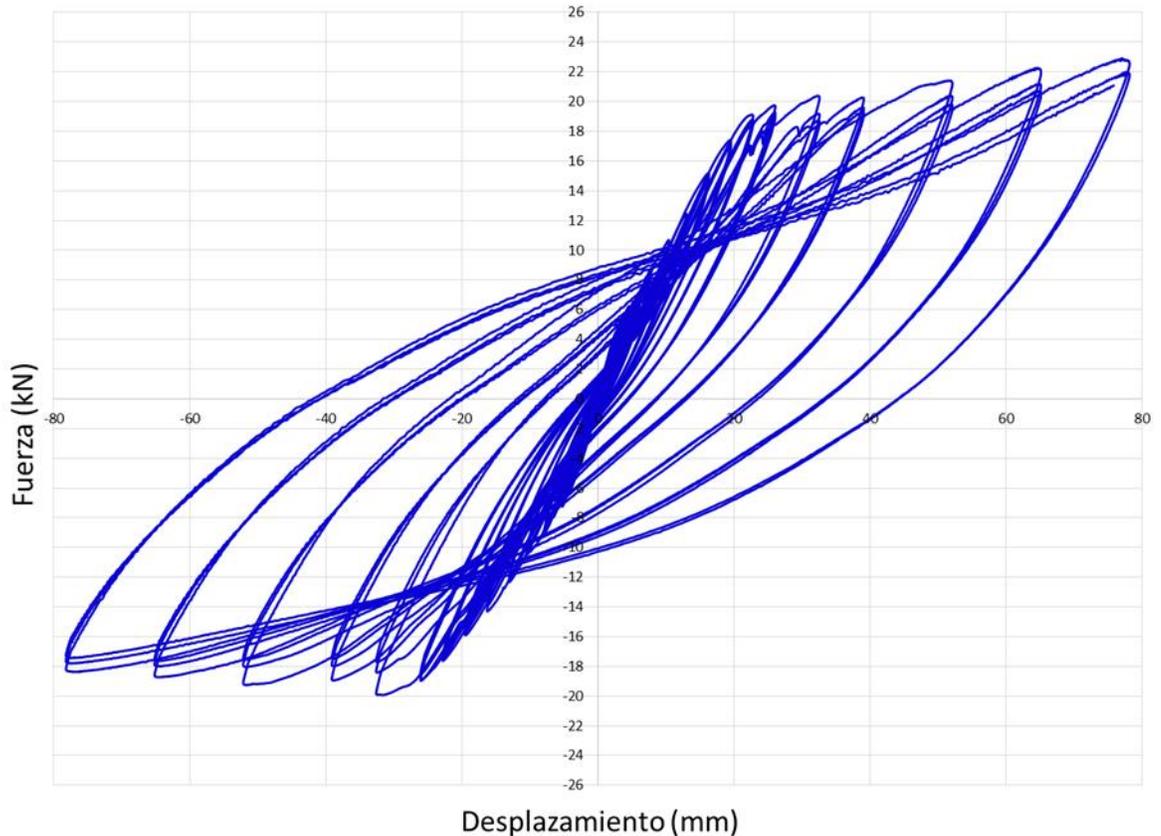


Figura 68. Ciclos de histéresis de la viga 0.5%-A.

Como se puede observar en la Figura 68, la viga 0.5%-A logró una carga máxima de 22.9 kN y el máximo desplazamiento de 78.14 mm.

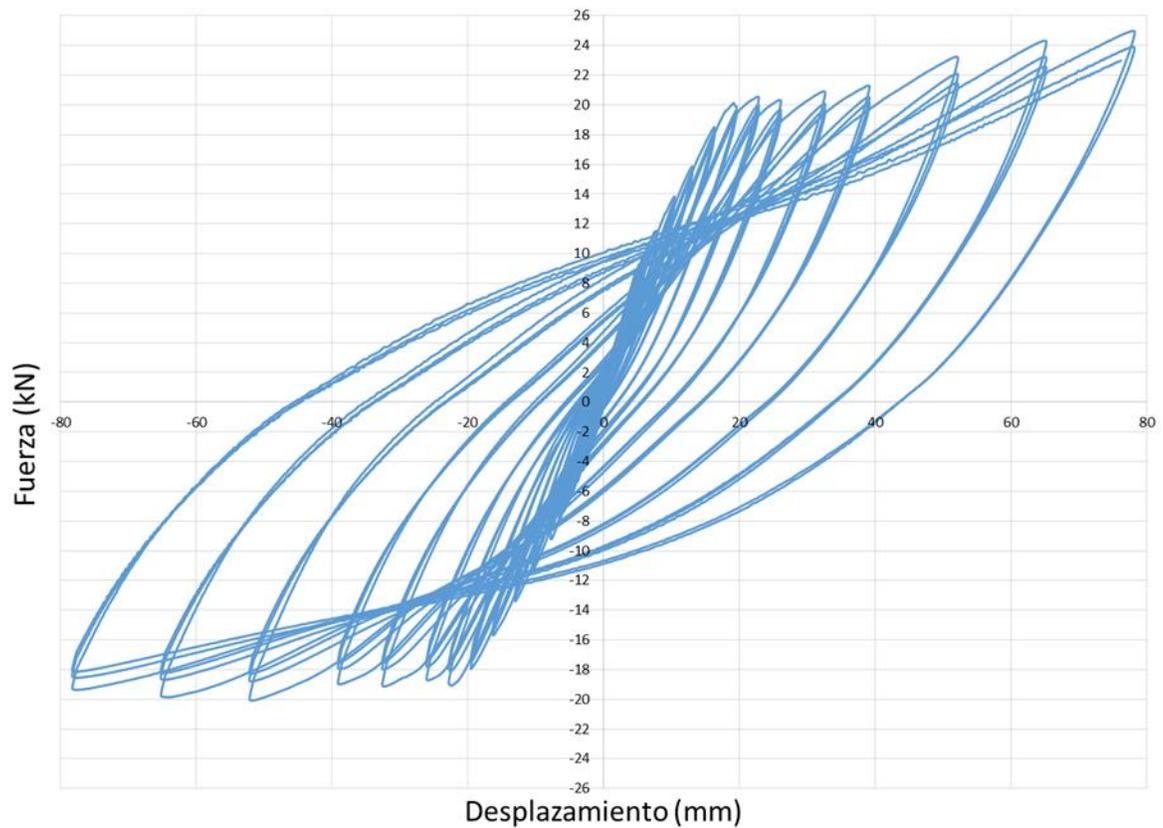


Figura 69. Ciclos de histéresis de la viga 0.5%-B.

Como se puede observar en la Figura 69 la viga 0.5%-B tuvo una carga máxima fue de 25 kN. Aunque la gráfica mostrada solo muestra los ciclos hasta el 6%, esta viga logró alcanzar hasta el 8% de deriva, teniendo que el máximo desplazamiento fue de 104.78 mm.

### 3.6.2.2. Vigas de 1% de dosificación de fibras

Del mismo modo, se presentan los resultados obtenidos para las vigas de UHPC con dosificación al 0.5% de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas hasta el 6% de deriva:

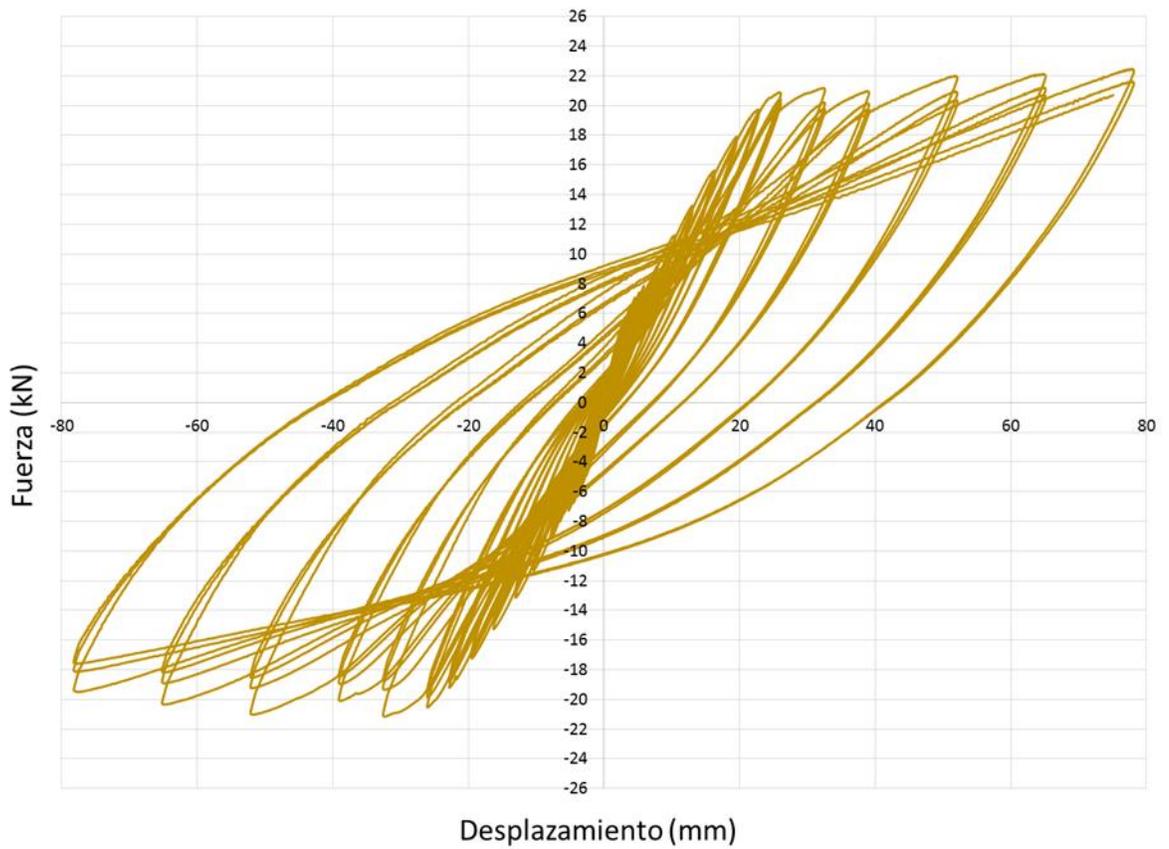


Figura 70. Ciclos de histéresis de la viga 1%-A.

Como se puede observar en la Figura 70 la viga 1%-A logró una carga máxima de 22.5 kN. Aunque la gráfica mostrada solo muestra los ciclos hasta el 6%, esta viga logró alcanzar hasta el 7% de deriva, teniendo que el máximo desplazamiento fue de 91.17 mm.

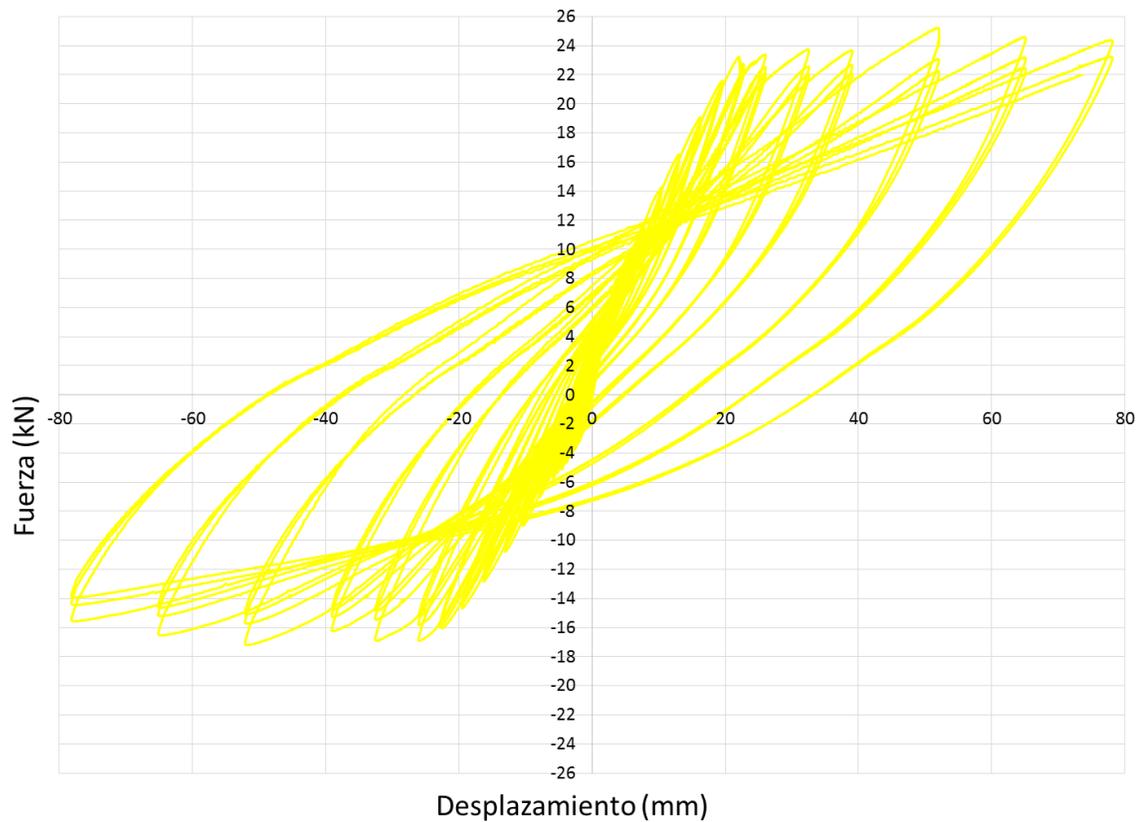


Figura 71. Ciclos de histéresis de la viga 1%-B.

Como se puede observar en la Figura 71 la viga 1%-B logró una carga máxima de 25.2 kN. Aunque la gráfica mostrada solo muestra los ciclos hasta el 6%, esta viga logró alcanzar hasta el 8% de deriva, teniendo que el máximo desplazamiento fue de 104.18 mm.

### 3.6.2.3. Vigas de 1.5% de dosificación de fibras

Igualmente, se presentan los resultados obtenidos para las vigas de UHPC con dosificación al 1.5% de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas hasta el 6% de deriva:

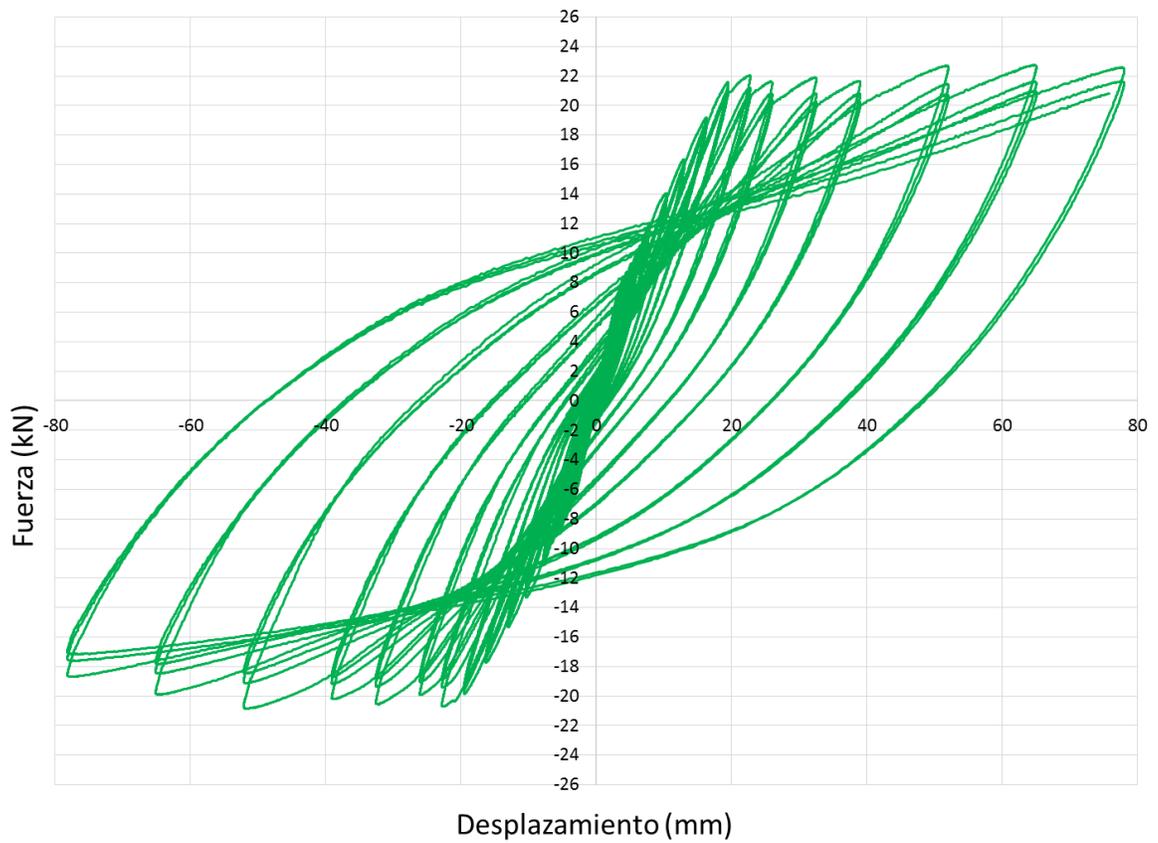


Figura 72. Ciclos de histéresis de la viga 1.5%-A.

Como se puede observar en la Figura 72 la viga 1.5%-A una carga máxima de 22.7 kN. Aunque la gráfica mostrada solo muestra los ciclos hasta el 6%, esta viga logró alcanzar hasta el 7% de deriva, teniendo que el máximo desplazamiento fue de 91.25 mm.

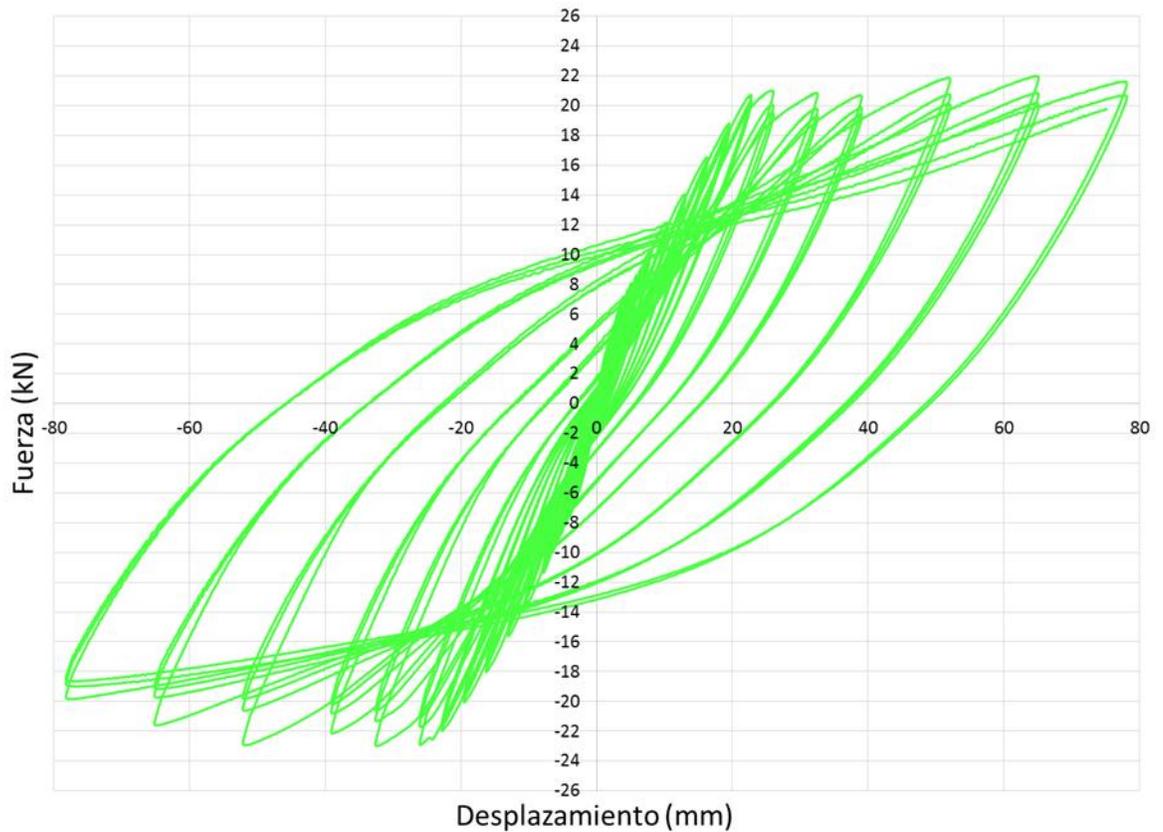


Figura 73. Ciclos de histéresis de la viga 1.5%-B.

Como se puede observar en la Figura 73 la viga 1.5%-B tuvo una carga máxima de 23 kN. Aunque la gráfica mostrada solo muestra los ciclos hasta el 6%, esta viga logró alcanzar hasta el 7% de deriva, teniendo que el máximo desplazamiento fue de 91.25 mm.

#### 3.6.2.4. Vigas de 1.5% de dosificación de fibras (solo fibra corta)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las vigas de UHPC con dosificación al 0.5% de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas:

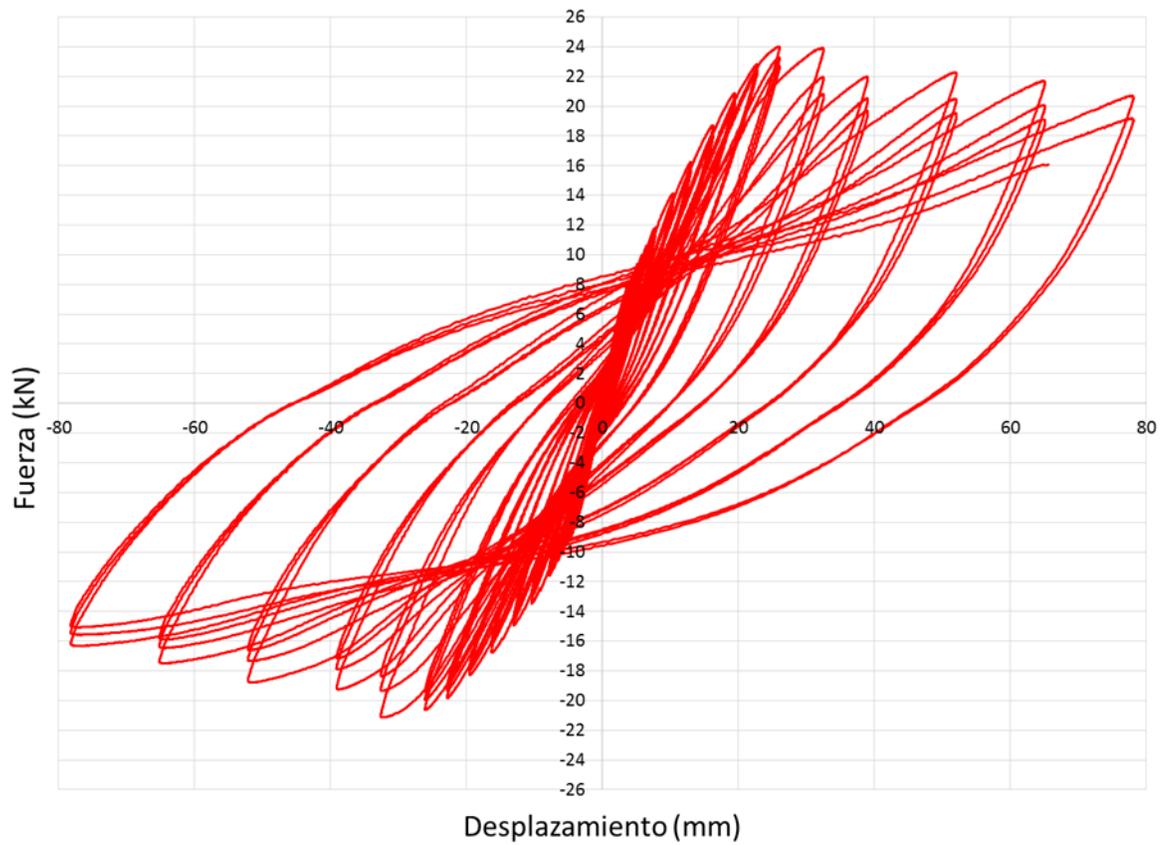


Figura 74. Ciclos de histéresis de la viga 1.5% FC-A.

Como se puede observar en la Figura 74 la viga 1.5% FC-A tuvo una carga máxima de 24 kN y el máximo desplazamiento fue para el 6% de deriva alcanzando un 78.15 mm.

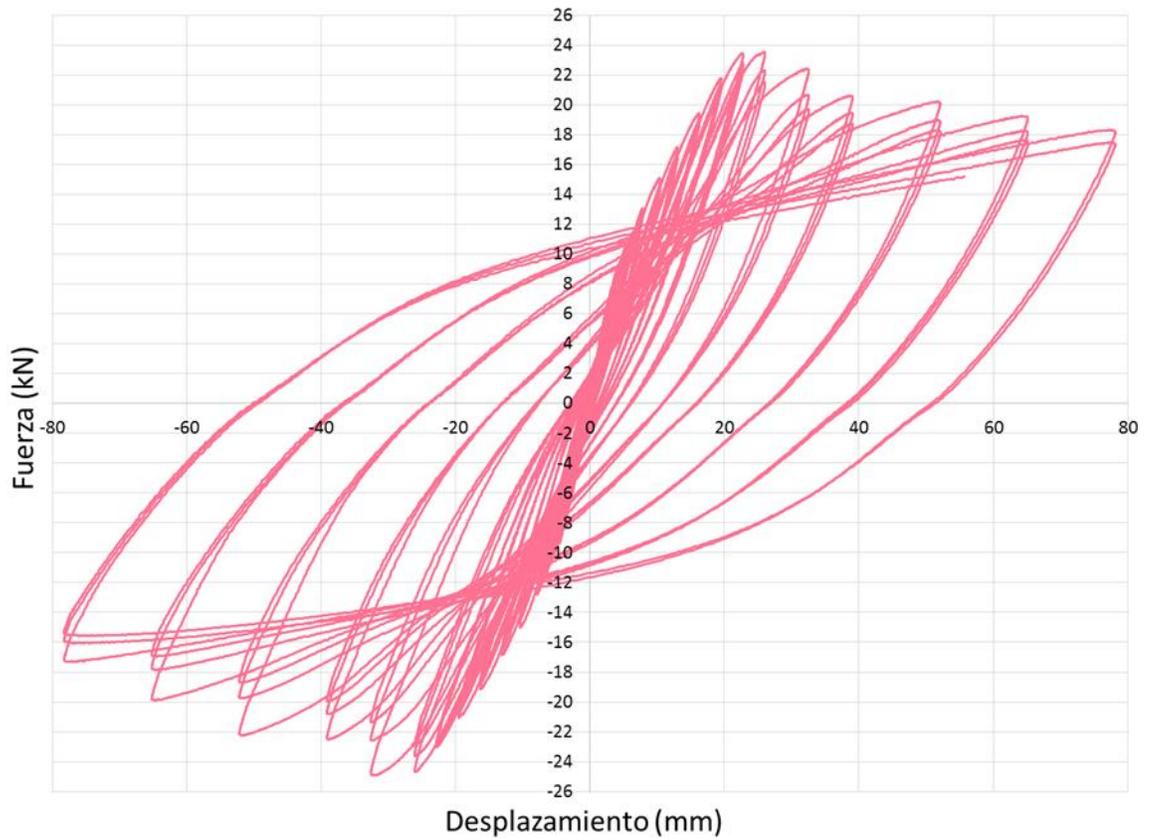


Figura 75. Ciclos de histéresis de la viga 1.5% FC-B.

Como se puede observar en la Figura 75 la viga 1.5% FC-B tuvo una carga máxima de 24.9 kN y el máximo desplazamiento fue para el 6% de deriva alcanzando un 78.22 mm.

### 3.6.2.5. Vigas de 2% de dosificación de fibras.

En la Figura 83 se presentan los resultados obtenidos para la viga de UHPC con dosificación al 2% de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas:

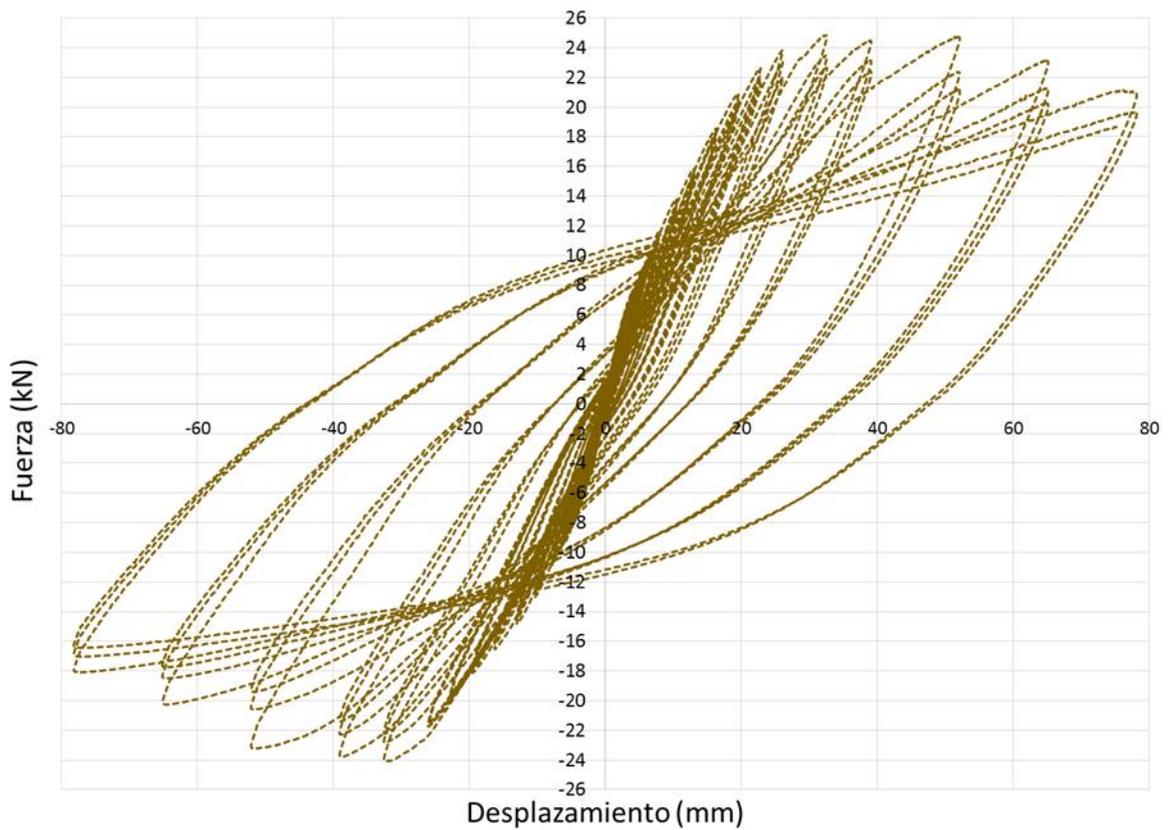


Figura 76. Ciclos de histéresis de la viga de 2%.

Como se puede observar en la Figura 76 la viga 2% tuvo una carga máxima de 25 kN y el máximo desplazamiento de 104.22 mm.

### 3.6.2.6. Vigas de uhpc sin fibras.

En la Figura 77 se presentan los resultados obtenidos para la viga de UHPC sin dosificación de fibras, por medio de los ensayos de carga cíclicas:

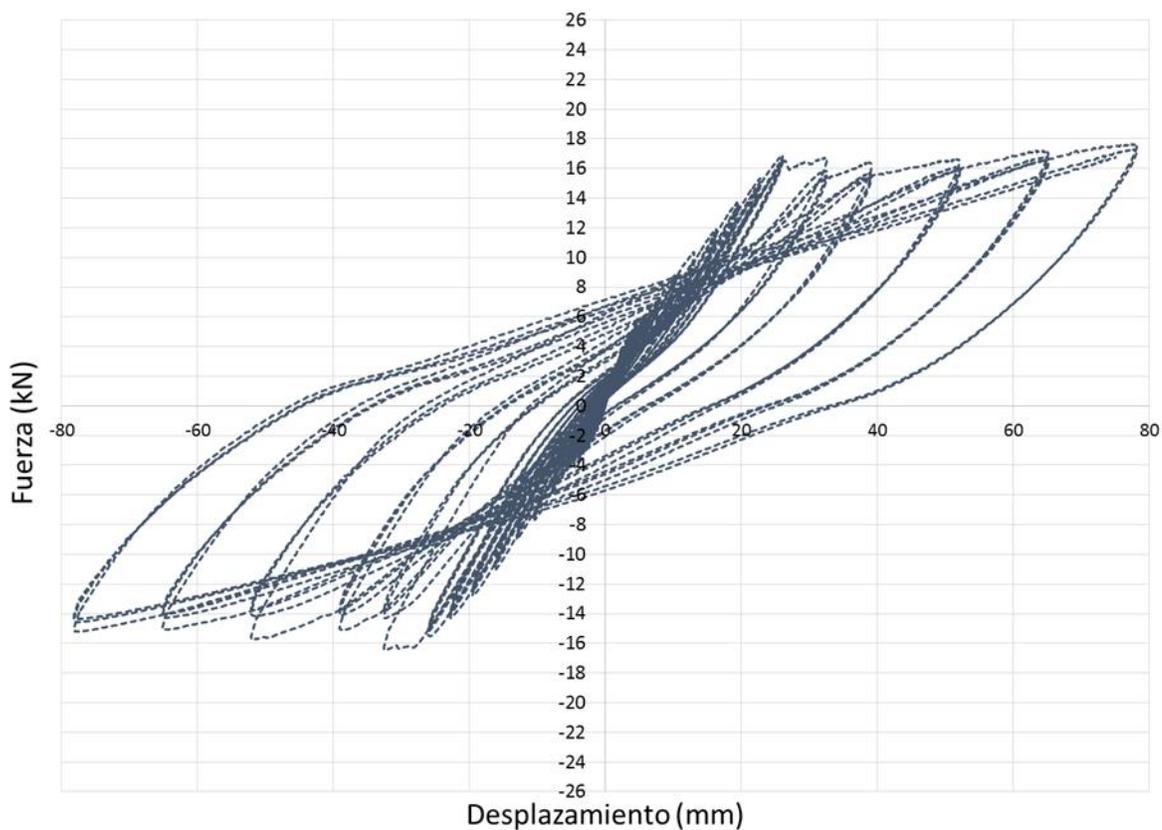


Figura 77. Ciclos de histéresis de la viga sin adición de fibras.

Como se puede observar en la Figura 84 la viga SF tuvo una carga máxima 17 kN y el máximo desplazamiento de 78.15 mm.

### 3.6.2.7. Vigas de concreto convencional.

Del mismo modo, se presentan los resultados obtenidos para la viga de concreto convencional, por medio de los ensayos de carga cíclicas:

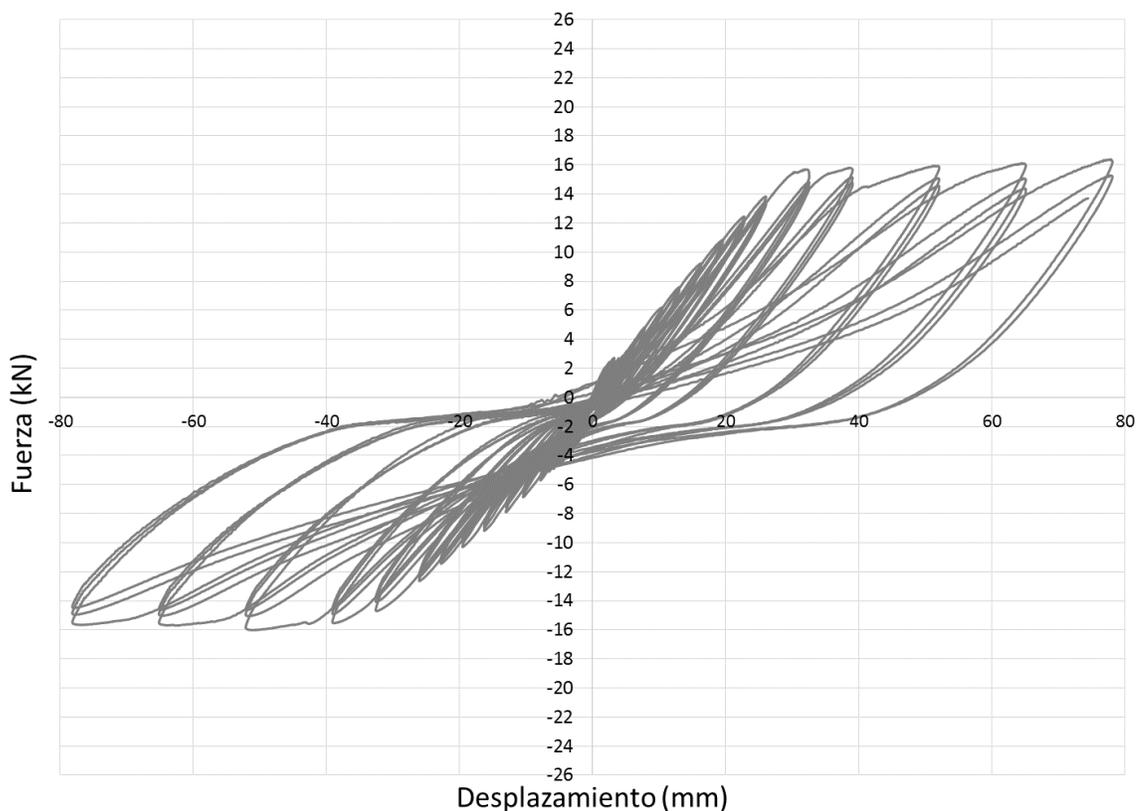


Figura 78. Ciclos de histéresis para la viga de concreto convencional.

Como se puede observar en la Figura 78 la viga CC alcanzó una carga máxima de 16.38 kN y el máximo desplazamiento de 78.15 mm.

#### 3.6.2.8. Comparación de ciclos de histéresis para deriva del 3% (39 mm).

En la Figura 79 se evidencia a través del ancho del ciclo de histéresis que las vigas que disiparon más energía fueron aquellas de 1.5% con combinación 50-50. Del mismo modo se puede observar que el concreto convencional se comporta de manera muy similar al UHPC sin fibras con respecto a la carga máxima, por lo que se puede concluir que la inclusión de fibras aumenta la capacidad de disipación de energía en elementos de viga.

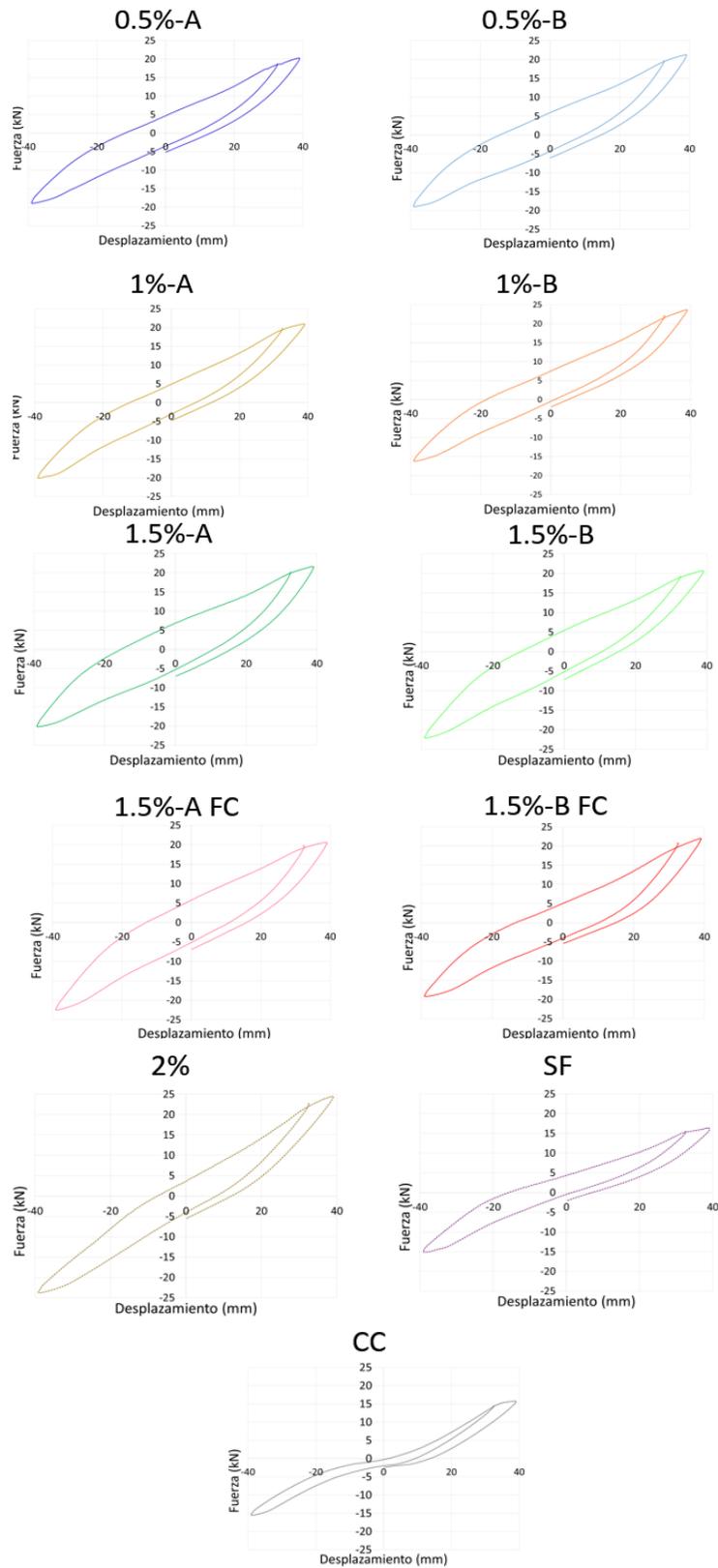


Figura 79. Ciclos de histéresis al 3% de deriva (39 mm).

### 3.6.3. ENERGÍA DISIPADA

Para determinar la energía disipada, se calculó el área por cada ciclo de histéresis para los diferentes niveles de deriva y para las diferentes vigas. La Figura 80 muestra la energía disipada con respecto al desplazamiento de cada una de las vigas.

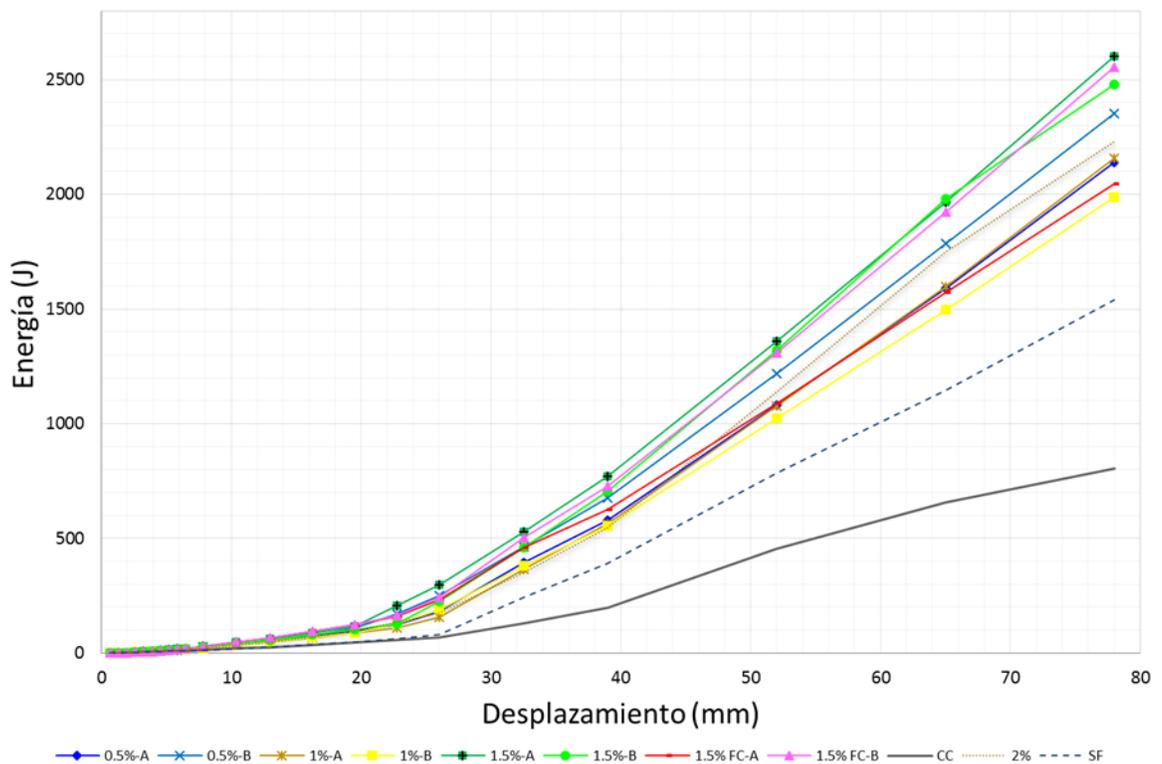


Figura 80. Energía disipada vs Desplazamiento.

La tendencia inicial del área disipada al interior de los ciclos de histéresis es similar para las 10 vigas, pero cuando empiezan a aparecer las fisuras, en un desplazamiento cercano a los 20 mm, cambia el comportamiento de estas, debido

a que las fibras empiezan a actuar restringiendo el movimiento de expansión de las mismas en el concreto generando disipación de energía.

Para las vigas con mayor porcentaje, es clara la tendencia obtenida en donde tres de las cuatro probetas elaboradas con la misma dosificación del 1.5% presentan comportamientos similares entre sí. Aunque la viga con dosificación del 2% no obtuvo mayor desempeño que aquellas con 1.5% de dosificación. Esto se debe a la manejabilidad de la mezcla durante el vaciado, a mayor cantidad de porcentaje de fibras menor manejabilidad. Realmente, al principio de la investigación se habían estipulado mezclas con 3% y hasta el 6% de dosificación de fibras metálicas, pero, solo se logró realizar el vaciado de una viga del 3% la cual debido a su alto contenido de fibras fue imposible manipular durante la fundida (ver Figura 81), lo que resultó en la eliminación de esta viga, descartándola para la realización de los ensayos y lo que hizo que posteriormente se modificaran los porcentajes a estudiar.



*Figura 81. Viga UHPC al 3% de dosificación de fibras metálicas.*

Sin embargo, para las vigas con dosificación del 0.5% y el 1% los resultados no fueron claros puesto que la viga 0.5%-B disipó más energía que las del 1%. Por ello se decidió hacer el corte en la sección transversal donde fallaron las vigas y contabilizar las fibras en las caras del corte, teniendo que, efectivamente la cantidad correspondiente a las fibras del 1% eran el doble de las 0.5%. Sin embargo, se pudo notar que la distribución de las fibras largas no era igual. Las vigas del 1% presentaban la mayor concentración de fibras en el centro de la sección transversal, cerca al eje neutro, donde efectivamente las fibras no podían cumplir la función de generar el par de fuerzas para contrarrestar el momento externo de la misma manera como si hubiesen estado en el perímetro de la sección transversal. Lo descrito anteriormente se puede esquematizar en la Figura 82, donde las flechas indican el sentido de la fuerza aplicada:

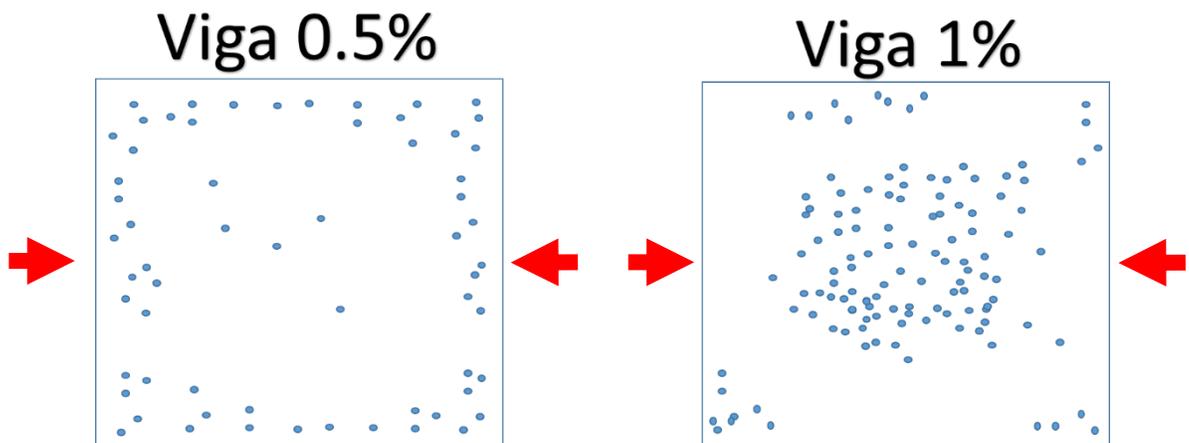


Figura 82. Esquema de distribución de fibras en las vigas ensayadas.

Se promediaron los especímenes ensayados (promedio de las dos vigas de cada dosificación) como se puede observar en la Figura 83. Es evidente que las mezclas de UHPC tuvieron un mejor desempeño que la de concreto convencional, teniendo que, las de 1.5%, 1.5% FC, 1% y 0.5% disiparon 216%, 186%, 179% y 158%, respectivamente, más energía que la de concreto convencional. Siendo que

la energía más baja entre las 6 mezclas de concreto evaluadas fue la de concreto convencional. Esto era de esperarse, ya que esta mezcla no tiene adición de fibras metálicas.

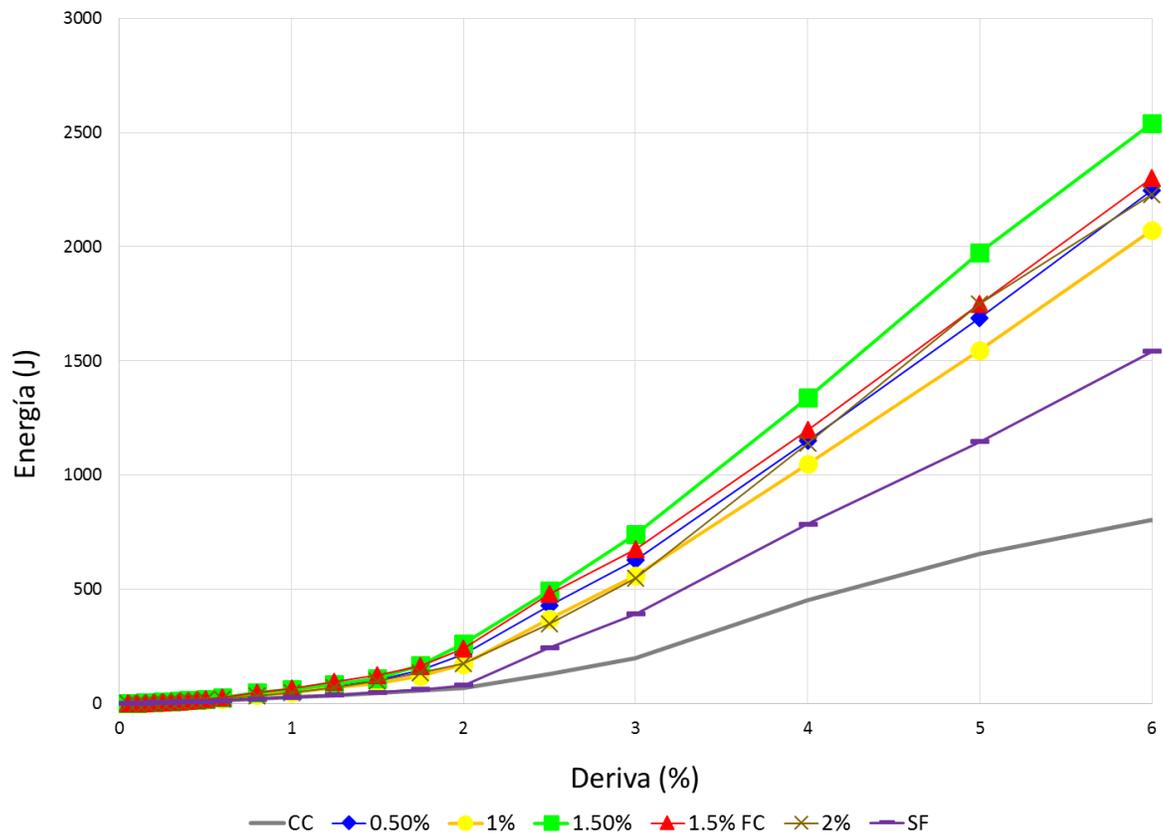


Figura 83. Energía vs Deriva del promedio de las vigas con sus respectivas dosificaciones.

### 3.6.4. RIGIDEZ VS DESPLAZAMIENTO

A través del método usado de carga y descarga se determinó la pérdida de rigidez a flexión de las vigas estudiadas, observando que esta rigidez, en términos de la pendiente de una gráfica de la fuerza de Carga-Desplazamiento como es el caso de los ciclos de histéresis, aumenta al incrementarse la dosificación de fibras.

Entonces, para la evaluación de la rigidez, se tomó en cuenta la pendiente de cada uno de los ciclos de histéresis con respecto a su desplazamiento. Como se muestra en la Figura 84, las mezclas que obtuvieron mayor rigidez al principio fueron aquellas con mayor dosificación. Sin embargo, se puede observar que a partir de 3% de deriva (39 mm) la rigidez de todas las vigas adquiere un comportamiento muy similar, no en cambio la de concreto convencional que sigue por debajo de las muestras con UHPC.

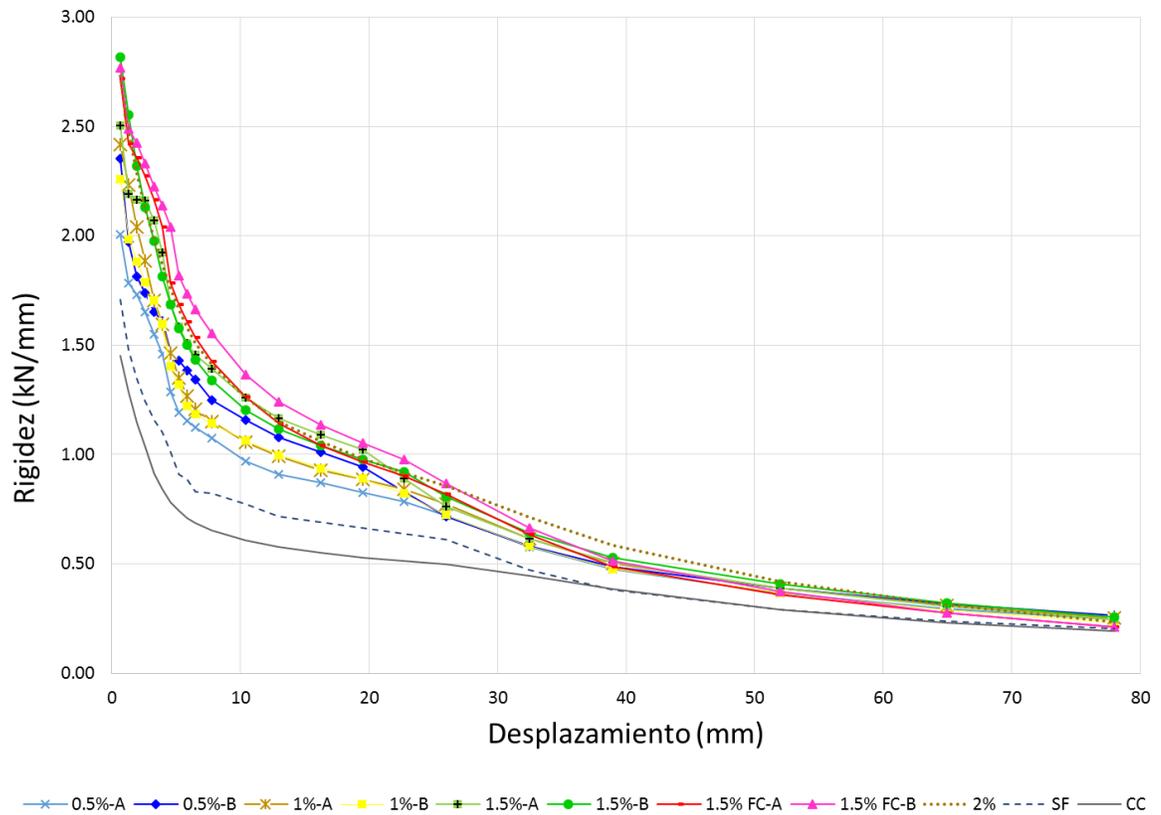


Figura 84. Rigidez vs Desplazamiento.

Entonces, como se muestra en la Figura 84 la rigidez inicial de las vigas depende directamente de la dosificación de fibra. Es decir que la fibra le aporta más rigidez al elemento.

La mezcla sin fibras a su vez muestra tener una mayor rigidez que la de concreto convencional al inicio. Sin embargo, después de alcanzar los 350 mm de desplazamiento el comportamiento de ambas mezclas es muy similar, lo cual indica que las fibras metálicas son un material que compuesto con concreto de ultra alto desempeño aporta rigidez a la flexión en el elemento estructural.

### 3.6.5. CAPACIDAD DE DUCTILIDAD AL DESPLAZAMIENTO

Este parámetro fue evaluado con base en el desplazamiento máximo entre el desplazamiento de fluencia. Sin embargo, la diferencia entre los especímenes de UHPC de acuerdo a la dosificación no es representativa.

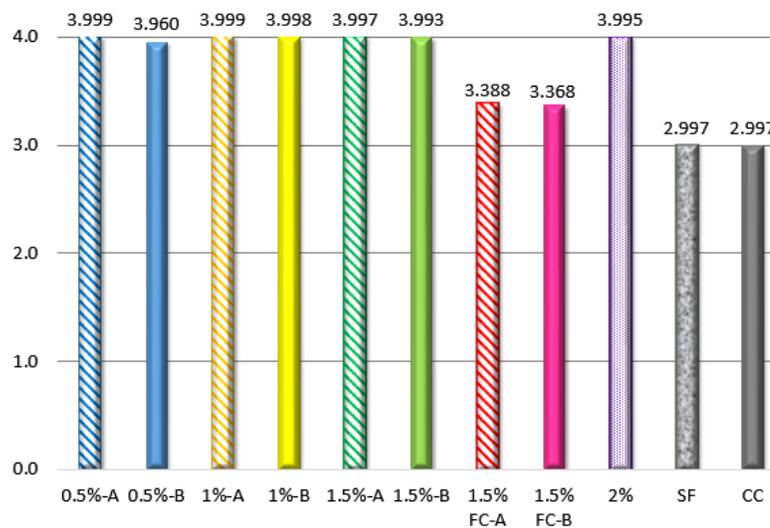
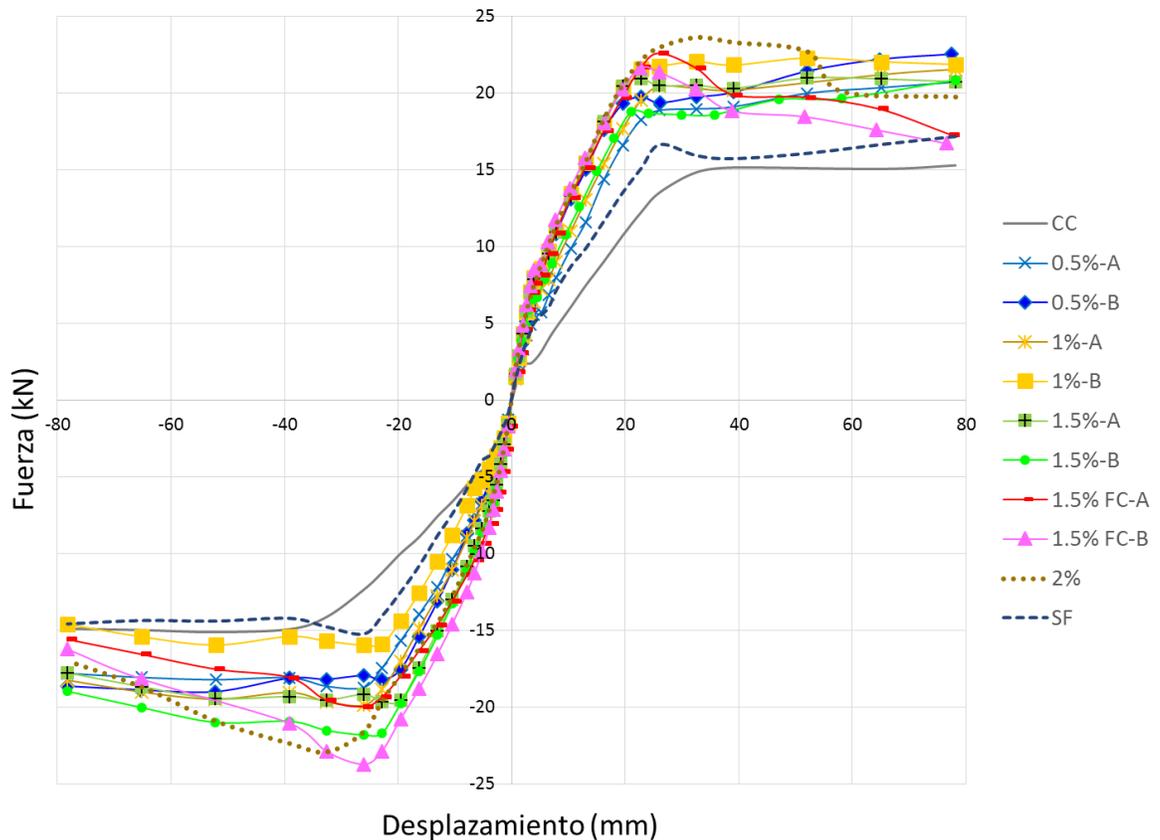


Figura 85. Capacidad de ductilidad al desplazamiento.

Como se muestra en la Figura 85, las mezclas de UHPC con diferentes dosificaciones de fibras obtuvieron entre 110% y un 130% mayor capacidad de ductilidad al desplazamiento que la de concreto convencional, no así aquella mezcla de UHPC sin fibras que obtuvo la misma magnitud.

### 3.6.6. PUSHOVER

El análisis no lineal por el método pushover, consiste en un empuje lateral incremental como el que hemos aplicado durante los ensayos de cargas cíclicas hasta que se supone se ha llegado al colapso. Para este estudio se tomó la envolvente de los picos máximos cada uno de los ciclos de histéresis. En la Figura 86 se puede observar como el desempeño de la viga de CC y la viga de UHPC SF tuvieron un desempeño inferior con respecto a las cargas que aquellas que contenían dosificación con fibras metálicas.



En este caso, se garantizó una falla con capacidad de ductilidad puesto que el acero fluyó después de que el concreto falló. En el pushover se observa cómo interviene la capacidad de la estructura, representada por la curva de capacidad, que se define como la relación entre las fuerzas laterales y los desplazamientos demandados por las mismas.

### **3.7. PATRONES DE FISURACIÓN EN EL PLANO**

#### **3.7.1. PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LOS PATRONES DE FISURACIÓN EN EL PLANO**

Para comparar los patrones de fisuración generada por las cargas cíclicas en vigas en voladizo de UHPC en función de la dosificación del porcentaje de las fibras metálica, se realizó la toma de fotografías en los puntos de máximo momento de los diferentes tipos de vigas durante el ensayo de cargas cíclicas, mediante la colocación de una cámara fotográfica del lado donde el concreto estuvo en contacto con la formaleta, se tomaron 2 fotografías por ciclo frente al marco de reacción (cada ciclo con una duración de 20 segundos).

Luego se identificaron las fisuras en las fotografías, haciendo una revisión técnica de la evolución de los patrones de las fisuras en las fotografías, recolectando las fotografías desde el inicio del patrón de la fisura (0.25% de deriva) hasta el nivel del 3% deriva alcanzado durante del ensayo, es decir, tomando en cuenta la ramificación que tuvieron las fisuras en los especímenes durante el ensayo.

Se midió a escala el área de la evolución de las fisuras en las fotografías, mediante el ancho y largo de la fisura en milímetros utilizando un software

comercial, de cada una de las fotografías correspondiente a las fisuras generadas en cada una de las vigas ensayadas para verificar cual fue la dosificación que generó mayor área.

Finalmente, se determinó la evolución de la fisuración en función de las cargas y las derivas alcanzadas mediante el análisis de la mayor fisura para cada uno de los tipos de vigas.

### **3.7.2. RESULTADOS DEL PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO PARA VIGAS**

#### **3.7.2.1. Área de fisuración con respecto al desplazamiento**

Para el patrón de fisuración se evaluó el desempeño de las vigas cualitativamente y cuantitativamente. Para evaluarlo cuantitativamente, se midieron las áreas de fisuración de acuerdo a cada uno de los desplazamientos alcanzados como se muestra en la Figura 87.

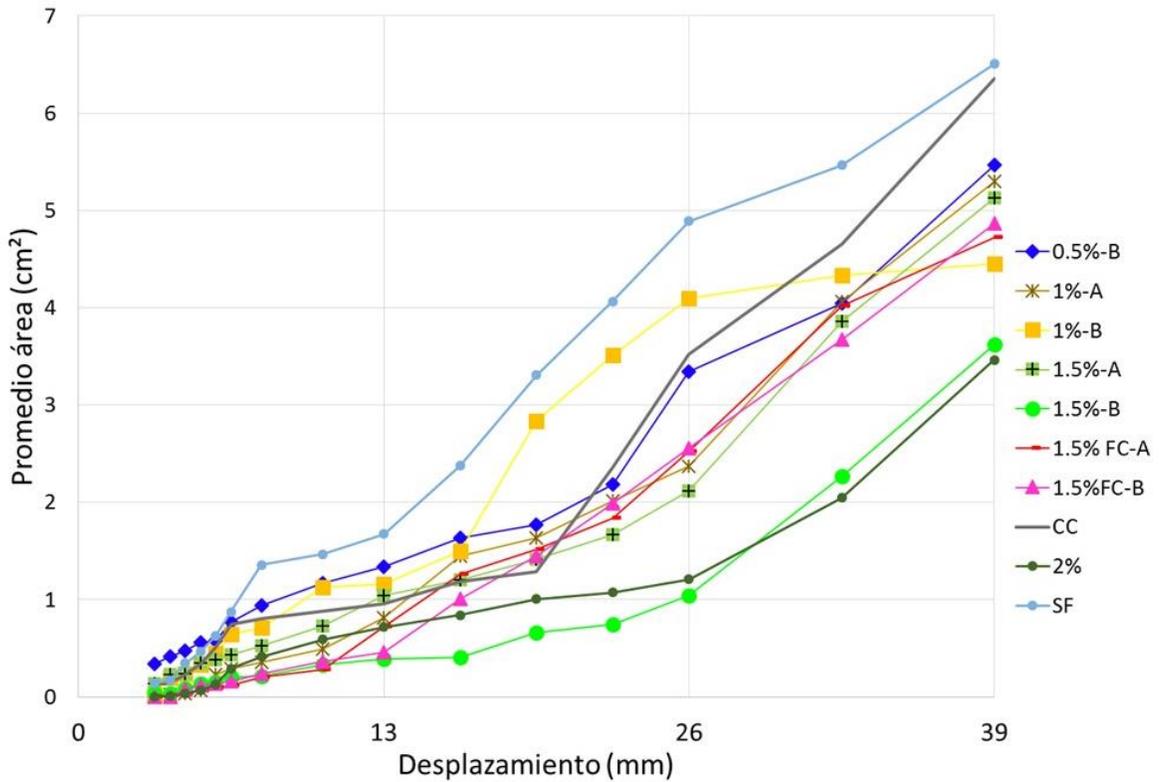


Figura 87. Área de fisuración vs Desplazamiento.

La Figura 87 muestra que mientras exista una mayor dosificación de fibras la fisuración está más restringida, aunque no solo es importante la cantidad de fibras sino también su distribución para el desempeño del elemento ante ciclos de carga y descarga. Lo que quiere decir que mientras se tenga una menor dosificación el desarrollo de la fisura será mayor a medida que aumenta el desplazamiento.

### 3.7.2.2. Área de fisuración con respecto a la energía disipada

Se decidió evaluar la capacidad de disipación de energía con respecto al área de fisuración para cada viga estudiada (ver Figura 88), teniendo que las que vigas

con comportamiento más estable, es decir, sin tanta variación a lo largo de la pendiente fueron aquellas con mayor dosificación. Aquellas que tuvieron menor dosificación tuvieron un comportamiento bastante variable a medida que aumentaron los desplazamientos.

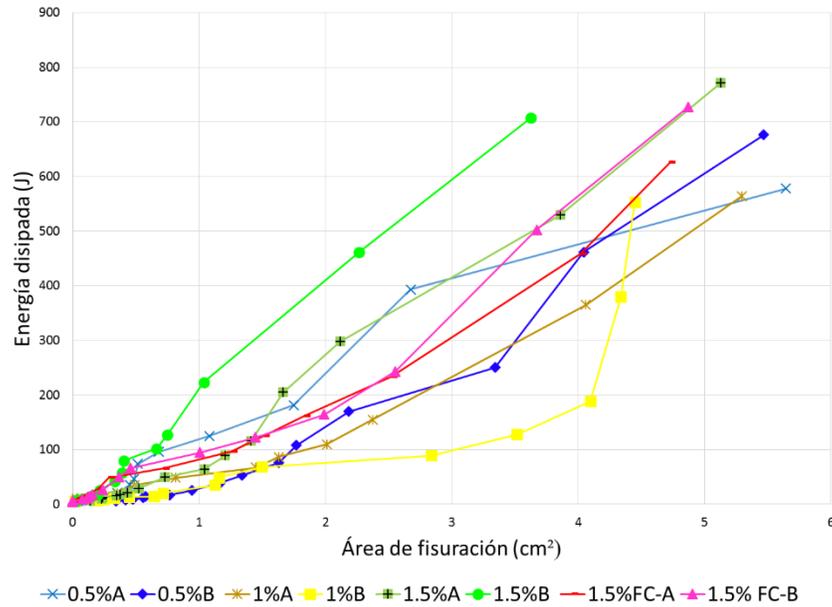


Figura 88. Área de fisuración vs Capacidad de disipación de energía.

### 3.7.2.3. Patrón de fisuración en el plano

Para definir los patrones de fisuración cualitativamente de cada viga se decidió pintar las vigas con una pintura a base de aceite y ver la evolución de la fisuración para el 1%, 2% y 3% de deriva. Sin embargo, pudimos constatar dos cosas: la primera, es importante no pintar la viga puesto que existen algunas fisuras pre-existentes que terminan por desarrollarse durante el ensayo; la segunda, existen circunstancias en las que la fisura existe pero la elasticidad de la pintura no permite que se note en la fotografía.

### 3.7.2.3.1. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC CON 0.5% DE DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.

Como se puede observar en la Figura 89, la viga del 0.5%- A desarrolló su fisura a lo largo del nudo. Además presentó fisuras generalizadas en todo el elemento así como varios desprendimientos del material.

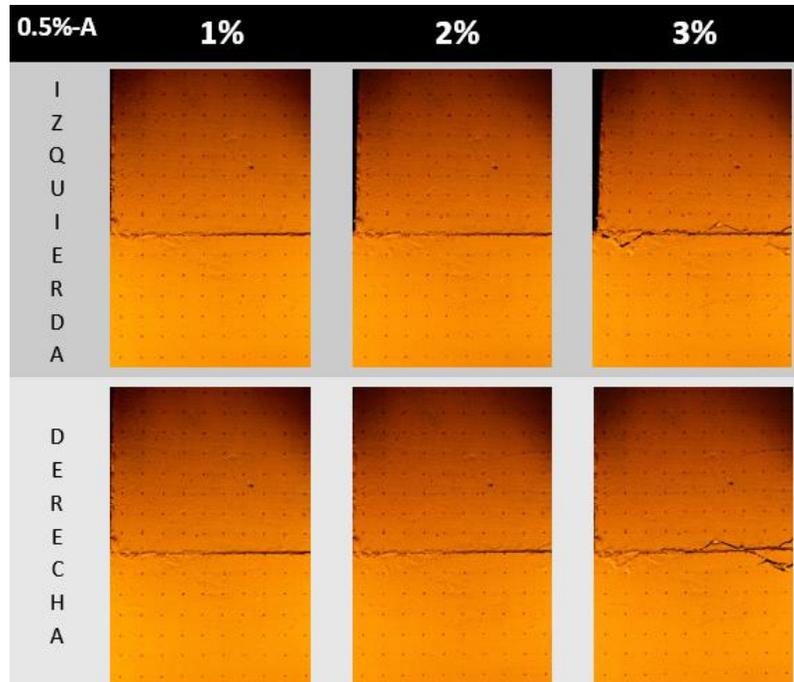


Figura 89. Patrón de fisuración en el plano para la viga 0.5%-A.

En la Figura 90, también se puede observar que la viga del 0.5%- B desarrolló su fisura a lo largo del nudo, tanto para las cargas aplicadas a la derecha como las cargas aplicadas a la izquierda. Al igual que la otra viga del 0.5% presentó fisuras generalizadas en todo el elemento, así como varios desprendimientos del material. Sin embargo, esta viga restringió bastante la amplitud de las fisuras puesto que tenía una gran distribución de fibras largas en todo el perímetro.

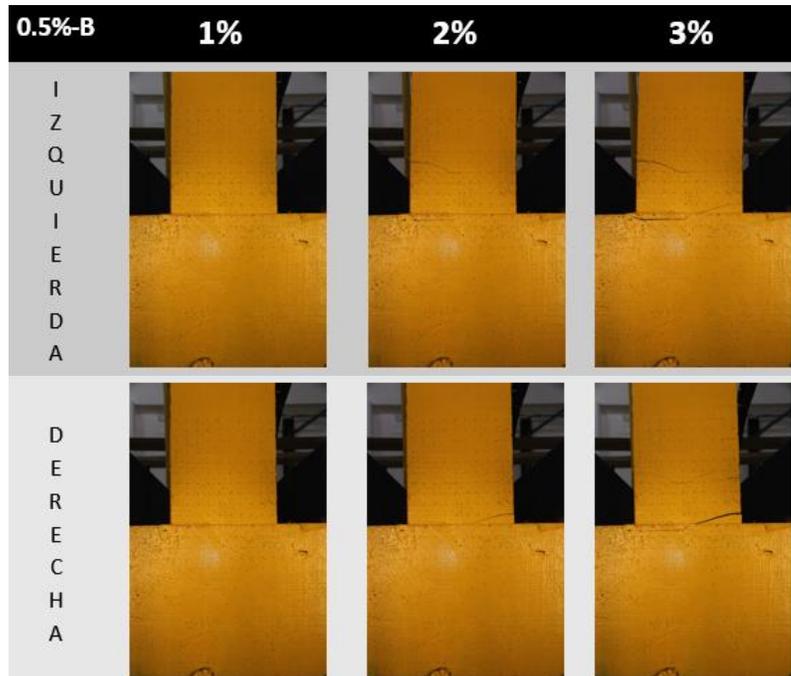


Figura 90. Patrón de fisuración en el plano para la viga 0.5%-B.

### 3.7.2.3.2. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC CON 1% DE DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.

Para la viga del 1%-A el desarrollo de las fisuras fue bastante ramificado. Sin embargo, la fisura mayor estuvo por encima del nudo (Figura 91). Además, presentó fisuras generalizadas, la mayor parte cerca del nudo del elemento, así como varios desprendimientos del material.

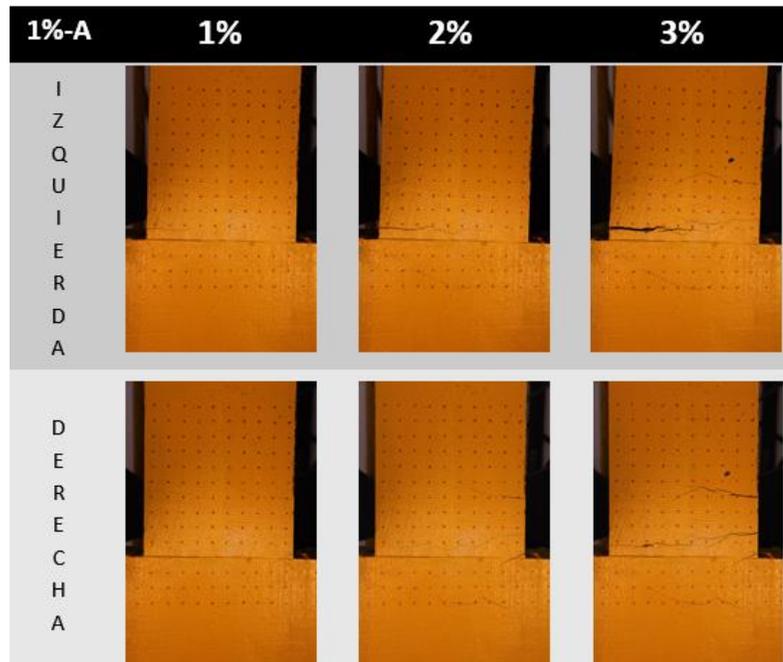
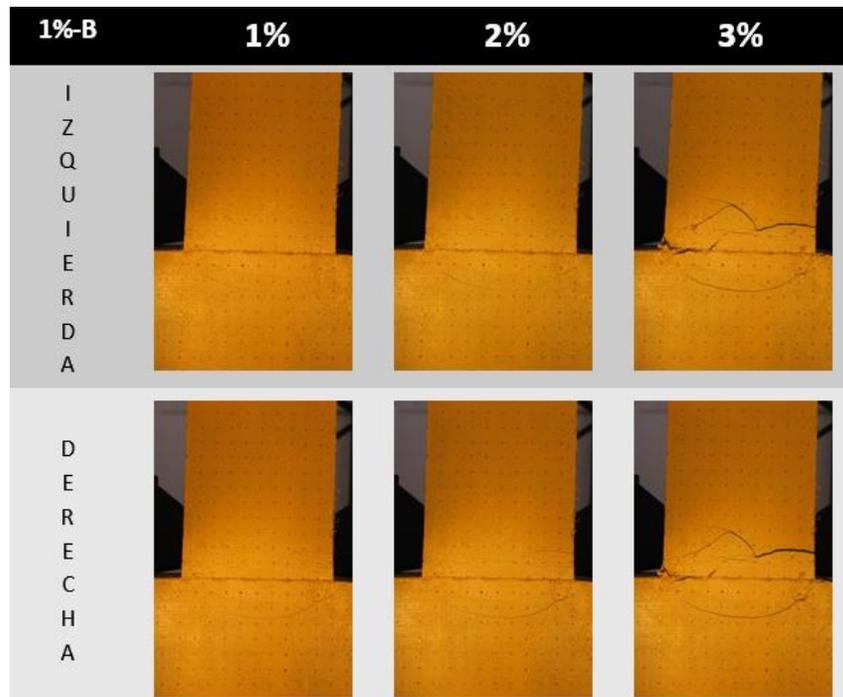


Figura 91. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1%-A.

Para la viga del 1%- B el desarrollo de las fisuras estuvo concentrado en el nudo de la viga. Incluso, la fisura mayor estuvo por debajo del nudo. Además, presentó fisuras generalizadas, la mayor parte cerca del nudo del elemento, así como varios desprendimientos del material como se observa en la Figura 92. La razón por la que la fisuración en este elemento fue bastante pronunciada es porque la mayor concentración de fibras largas se encontraba cerca del eje neutro, lo cual no era significativo puesto que las fibras largas trabajan restringiendo el movimiento siempre y cuando se encuentren en el perímetro del elemento como ya se ha mencionado anteriormente.



*Figura 92. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1%-B.*

### **3.7.2.3.3. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC CON 1.5% DE DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.**

En el caso de las vigas con porcentaje de 1.5% se encontró pre-existencia de fisuras por asentamiento plástico que marcaban los estribos del armado del elemento (Figura 93 y 95).



*Figura 93. Fisuración por retracción y asentamiento plástico en viga de UHPC. .*

Como se puede observar en la Figura 94, la viga del 1.5%-A desarrolló su fisura lejos del nudo a causa las fisuras por asentamiento plástico, La presencia de gran cantidad de fibras largas se concentró en el nudo. Del mismo modo, presentó pocas fisuras generalizadas en todo el elemento, así como desprendimientos del material.

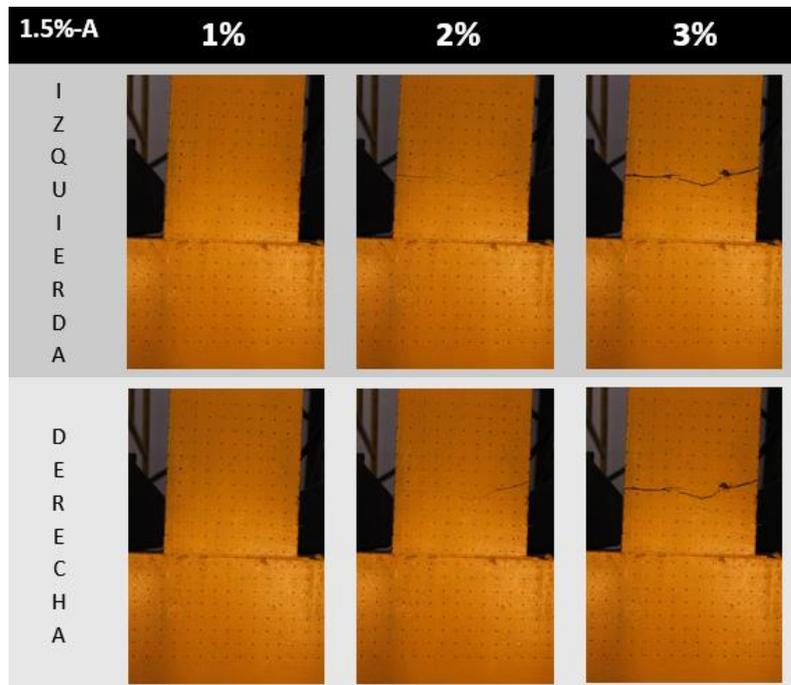


Figura 94. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5%-A.



Figura 95. Falla de las vigas de 1.5%.

Igualmente, la viga del 1.5%- B desarrolló su mayor fisura lejos del nudo a causa de la pre-existencia de fisuras por asentamiento plástico explicado

anteriormente. También presentó pocas fisuras generalizadas en todo el elemento, así como no hubo desprendimientos del material como se observa en la Figura 96.

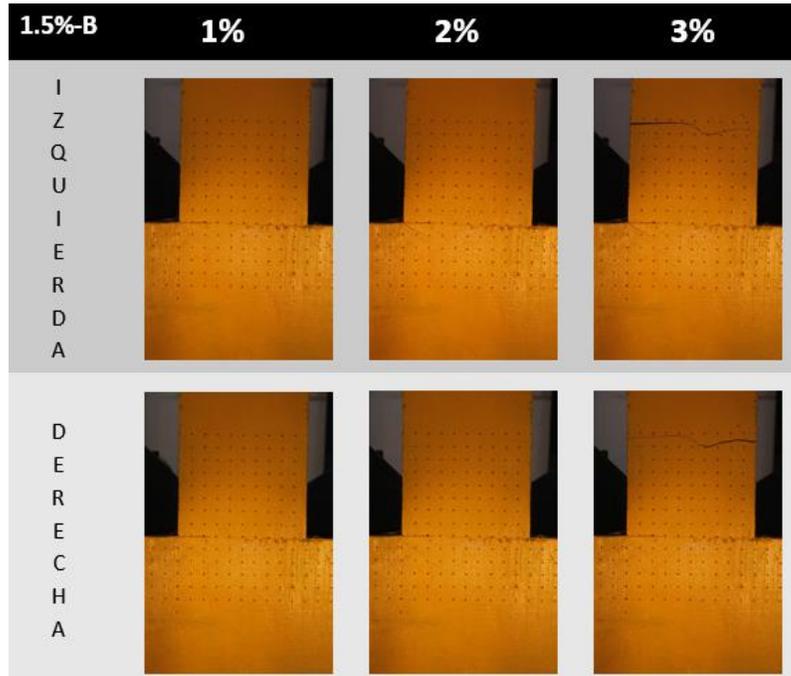


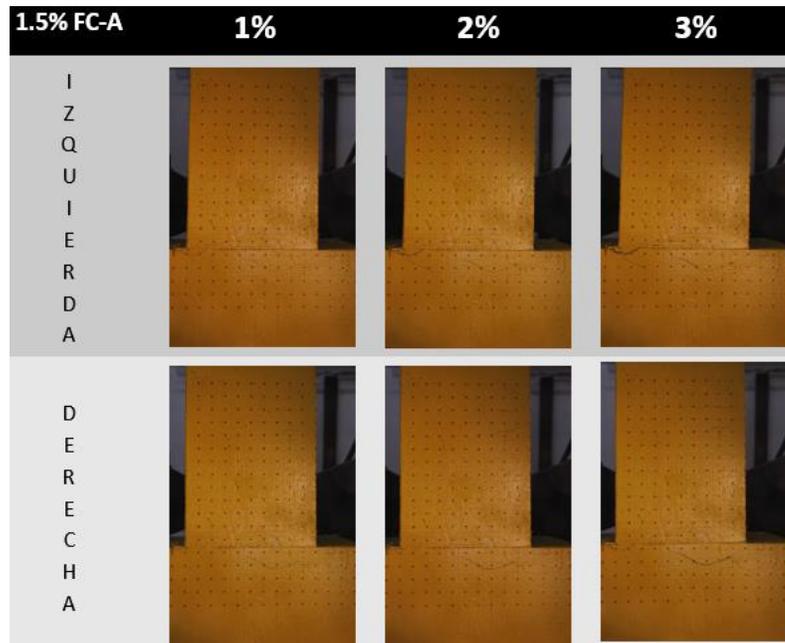
Figura 96. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5%-B.

Por consiguiente, se puede comparar que ambas mezclas del 1.5% tuvieron la mayor fisura lejos del nudo, y el desarrollo de dicha fisuración fue bastante controlado en comparación a las demás, esto debido a la cantidad de fibras largas.

#### *3.7.2.3.4. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC CON 1.5% DE DOSIFICACIÓN DE FIBRAS CORTAS.*

Se puede observar en la Figura 97, que la viga del 1.5% FC-A desarrolló su fisura a lo largo del nudo, aunque la ausencia de fibras largas hizo que la fisura no

tuviera restricción de la amplitud a medida que aumentaban los desplazamientos. A causa de esto, presentó fisuras generalizadas en todo el elemento, pero poco desprendimiento del material.



*Figura 97. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5% FC-A.*

Del mismo modo, la viga del 1.5%FC- B desarrolló su mayor fisura en el nudo a causa de la inexistencia de fibras largas. También presentó varias fisuras generalizadas en todo el elemento, así como no hubo desprendimientos del material como se observa en la Figura 98.

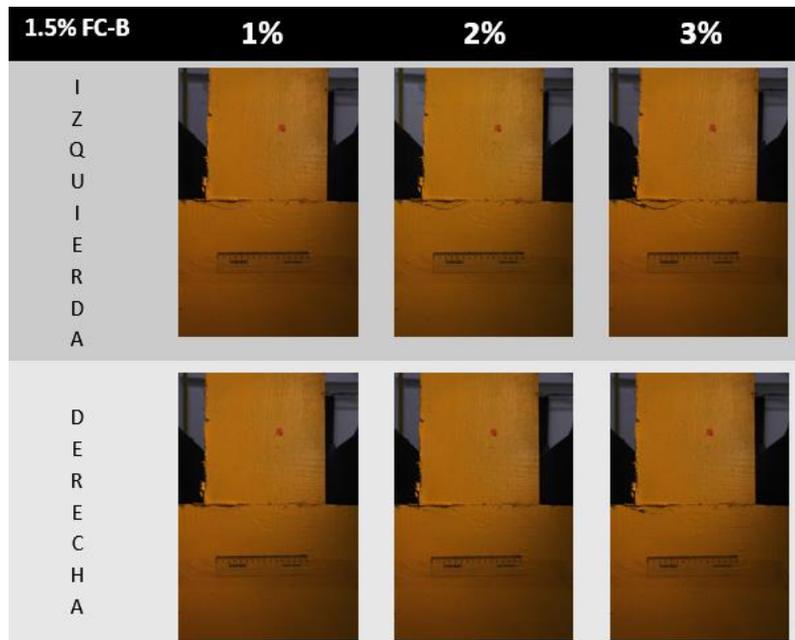


Figura 98. Patrón de fisuración en el plano para la viga 1.5% FC-B.

Además, se evidenció la fisuración proveniente de la pre-existencia de fisuras, lo cual es normal en el concreto convencional. Igualmente presentó fisuras generalizadas en todo el elemento así como mucho desprendimiento del material.

#### 3.7.2.3.5. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC CON 2% DE DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.

Para la viga del 2% el desarrollo de las fisuras fue bastante controlado. Sin embargo la fisura mayor estuvo por encima del nudo como se muestra en la Figura 105. Además presentó pocas fisuras generalizadas a lo largo del elemento así como no hubo desprendimiento del material (Figura 99).

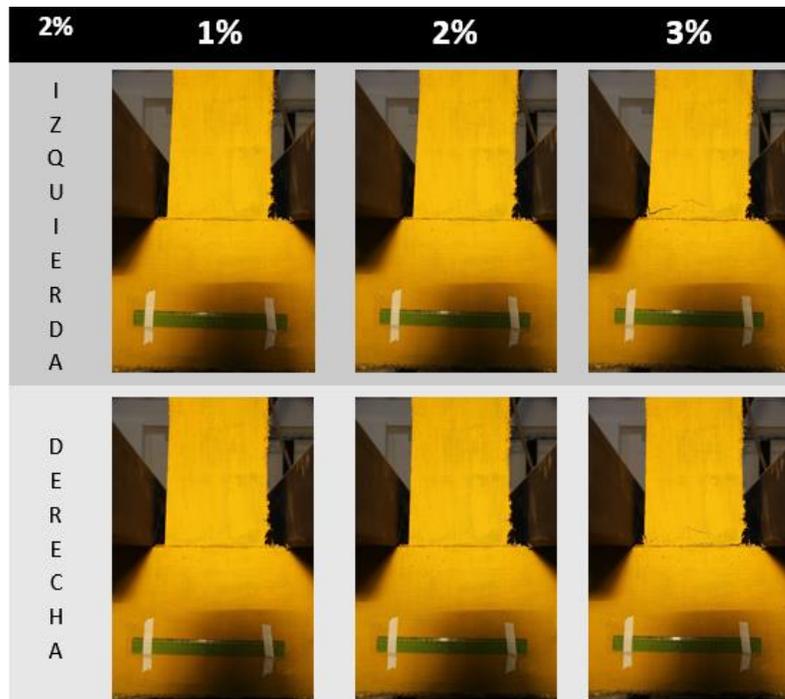


Figura 99. Patrón de fisuración en el plano para la viga 2%.

### 3.7.2.3.6. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE UHPC SIN DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.

Para la viga SF el desarrollo de las fisuras fue bastante desordenado. Esto debido a que no existía la presencia de fibras que suturaran las fisuras pre-existentes. Por lo tanto, la fisuración fue generalizada en todo el elemento así como el excesivo desprendimiento del material (ver Figura 100).

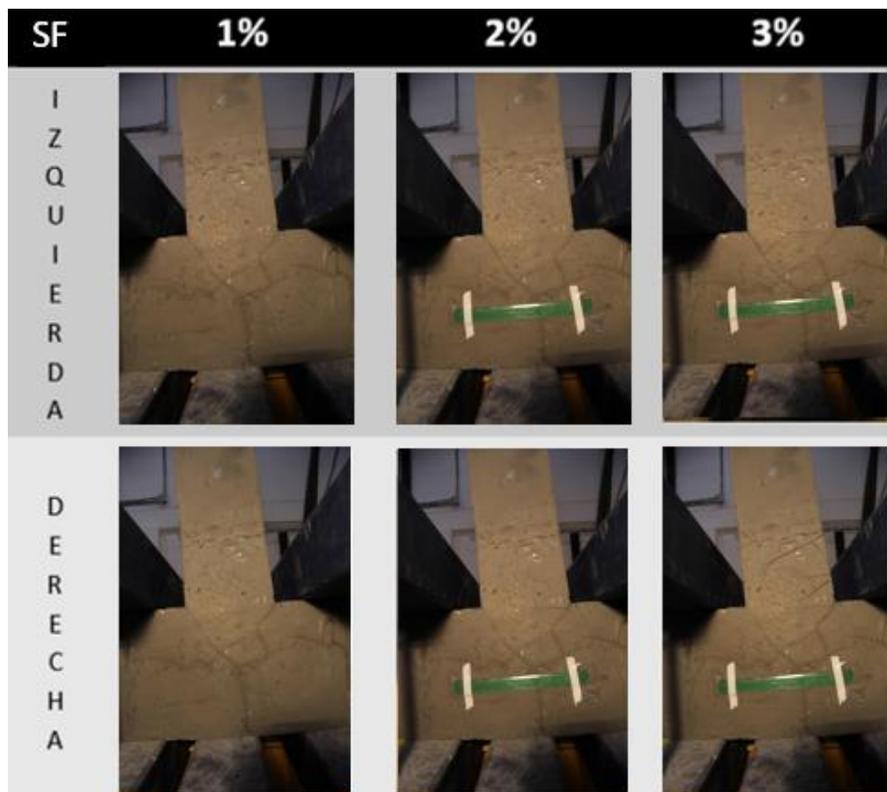
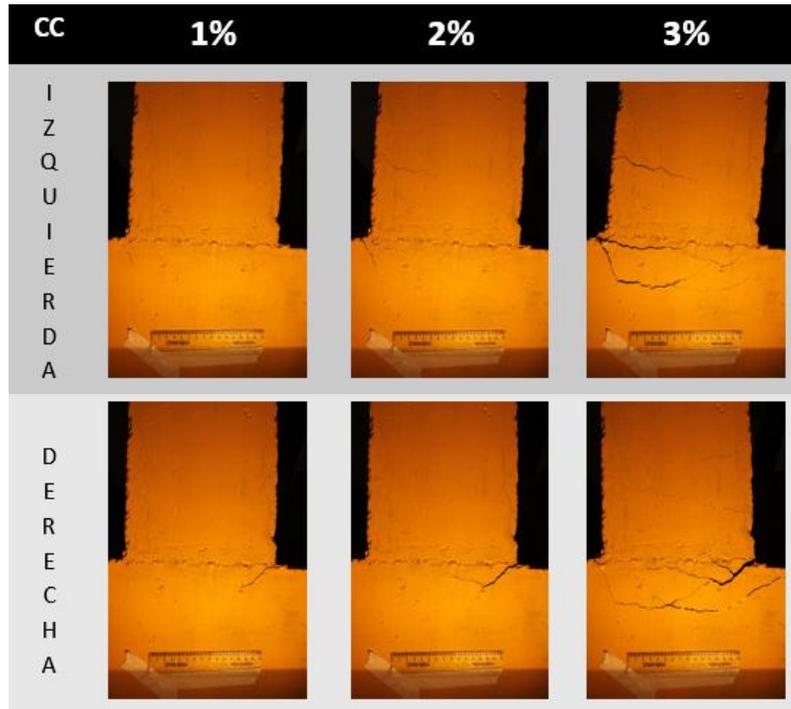


Figura 100. Patrón de fisuración en el plano para la viga de UHPC sin fibras.

### 3.7.2.3.7. PATRÓN DE FISURACIÓN EN EL PLANO DE VIGAS DE CONCRETO CONVENCIONAL.

Para el caso del concreto convencional, se decidió pintar la viga esta vez con una pintura a base de agua, tipo mate, para evaluar si era posible que la fisura tuviera mejor visibilidad que con la pintura anterior. Sin embargo, el resultado fue el mismo, puesto que la pintura también tiene una deformación que entra en juego en la restricción de la fisuración. En consecuencia, no se tiene la deformación intrínseca del concreto, sino, la deformación de la pintura con respecto a la deformación del concreto a medida que aumentan los desplazamientos.



*Figura 101. Patrón de fisuración en el plano para la viga CC.*

Como se muestra en la Figura 101, la viga de CC desarrolló su fisura en el nudo a 45° a causa de las fuerzas aplicadas que generaron flexión en el elemento.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 4.1. ENSAYOS PRELIMINARES DE RESISTENCIA FLEXURAL

Para el cálculo de la resistencia flexural y con base en la norma EFNARC (1996), se determinaron las curvas de carga-deflexión. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia flexural es posible afirmar que como se observa en la Figura 57 la combinación de fibras ideal para la mezcla con dos tipos de UHPC es la de 50% fibra corta- 50% fibra larga, ya que ésta combinación logró tener una resistencia a la flexión 12.5% mayor que la de fibras cortas y lisas. Esto es porque el concreto reforzado con fibras es un material compuesto con elevada tenacidad. Esto corrobora los estudios realizados en el 2012 con respecto a las propiedades mecánicas y la durabilidad (Magureanu et al., 2012, 177-183), en donde se llegó a la conclusión de que dependiendo del tamaño de la muestra y la adición de fibras metálicas híbridas, es decir de varios tipos, aumentaba la resistencia a la flexión del UHPC en 140%.

En el caso de la investigación de Ruiz, Logreira, Ramírez y León aunque todas las vigas alcanzaron una carga a flexión máxima similar, la mezcla CF1 (concreto convencional adicionado con porcentaje de 0.25% de fibras metálicas) presenta una disminución de la resistencia que la mezcla CF2 (concreto convencional adicionado con porcentaje de 0.50% de fibras metálicas), lo cual indica que CF1 posee una resistencia residual en promedio más baja que CF2.

Además, estos resultados tienen similitudes al estudio realizado en el 2016 (Wu, Zemei et al. 2016), en el que se concluyó que las resistencias a la flexión y

compresión finales aumentaron en la medida en la que aumentó el contenido de fibras y la edad del concreto, lo cual es similar a los resultados obtenidos en esta investigación teniendo en cuenta que aquella mezcla que no tenía dosificación de fibras fue mayor que la mezcla que tenía 0.5% de dosificación de fibras metálicas. En la investigación realizada por Zemei Wu y compañía la resistencia a la flexión última de muestras UHPC sin ninguna fibra eran 19 MPa a los 90 días. Con la incorporación de fibras de metálicas lisas al 3%, los valores correspondientes alcanzaron más de 35 MPa.

#### **4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Para el estudio realizado en el 2016 (Wu, Zemei et al. 2016) las muestras de UHPC con dosificación 3% tipo hooked y de fibras onduladas aumentaron la resistencia a la compresión en un 48 % y 59 % a 28 días en comparación con los que tienen la misma cantidad de fibra recta. En el caso de esta investigación el aumento de la resistencia a la compresión de la mezcla con fibras onduladas con respecto a la fibra corta lisa en la misma dosificación fue del 10%. En la investigación realizada por Zemei Wu y compañía la resistencia a la compresión últimos de muestras UHPC sin ninguna fibra eran 105 MPa a los 90 días. Con la incorporación de fibras de metálicas lisas al 3%, los valores correspondientes alcanzaron más de 150 MPa. Para esta investigación el aumento de la resistencia a compresión de las mezclas con fibras fue de 146 MPa y 147MPa para las dosificaciones del 1% y el 1.5% respectivamente, y resistieron 3% y 4% más que aquella mezcla de UHPC sin adición de fibras.

### **4.3. ENERGÍA DISIPADA**

Los resultados obtenidos en esta investigación donde los ensayos en vigas de UHPC con mayor dosificación lograron disipar más energía que la viga de concreto convencional y la viga de UHPC sin fibras. Esto muestra lo ventajoso que es el uso de fibras metálicas para el uso de elementos estructurales que formen parte del sistema sismorresistente puesto que el UHPC con fibras metálicas no rompe después de producirse la primera fisura y permite que puede llegar a deformarse a cargas mayores para las que se inició la fluencia, es decir, la fibra hace que el UHPC sea un material con una alta capacidad de ductilidad en comparación con el concreto convencional. Para mostrar este punto, en la Figura 80 se resume el cálculo de la energía disipada por cada ciclo de histéresis para diferentes niveles de deriva y para las diferentes vigas. La tendencia inicial del área disipada al interior de los ciclos de histéresis es similar para las 11 vigas, pero cuando empiezan a aparecer las fisuras, a un desplazamiento cercano a los 30 mm, cambia el comportamiento de estas, ya que las fibras empiezan a actuar aumentando la disipación de energía. Esto similar al estudio realizado por Ganesan, Indira y Abraham, (2007), en donde se ensayaron las juntas de HPC bajo carga cíclica positiva y se evaluó la resistencia a flexión, ductilidad y la disminución de la rigidez. Teniendo que aquellas mezclas con mayor dosificación tenían mayor rigidez, mayor capacidad de ductilidad y mayor resistencia a la flexión que las de concreto convencional.

De forma similar Mirmiran y Zohrevand en el estudio del 2013 demostraron que el mejor desempeño sísmico ante la señal de un sismo empleado fue la del novedoso sistema de columna que es un tubo de polímero relleno de UHPC, en comparación con concreto convencional, lo cual es parecido a lo demostrado en este estudio, aunque para la investigación realizada por ellos se difiere un poco en cuanto a la capacidad de ductilidad puesto que obtuvieron que la ductilidad del tubo

sin refuerzo fue aparentemente menor que la del concreto convencional que mostró una mayor capacidad de disipación de energía.

Además esta tendencia donde mientras mayor dosificación mayor capacidad de disipación de energía es similar a la reportada por el estudio de Ruiz, Logreira, Ramírez y León pudieron constatar que la mezcla CF2 (con mayor dosificación) es capaz de disipar más energía después de que el material alcance la carga máxima (falla inicial).

#### **4.4. PATRONES DE FISURACIÓN EN EL PLANO**

Para los patrones de fisuración también se demostró que mientras mayor dosificación de fibras en el nudo mayor control sobre la fisuración puesto que la fibra ayuda a suturar las fisuras como se muestra en la Figura 88. El concreto reforzado con fibras de acero no rompe después de producirse la primera fisura. Esto es similar a los resultados de las pruebas que hicieron Ganesan, Indira y Abraham (2007), indicaron que la provisión de fibras metálicas al HPC en las juntas mejora estos parámetros y reduce la fisuración. Al igual que en el trabajo de Ruiz, Logreira, Ramírez y León (2014), las fibras metálicas no fallaron, algunas se desprendieron de la matriz de concreto pero la mayoría quedaron ancladas, retrasando el crecimiento de las fisuras y aportando tenacidad al material. Gracias a su larga y fina forma, la fibra de acero tiene el mayor efecto de red de fibra a lo largo del concreto. Esto resulta en el más óptimo control de fisuras.

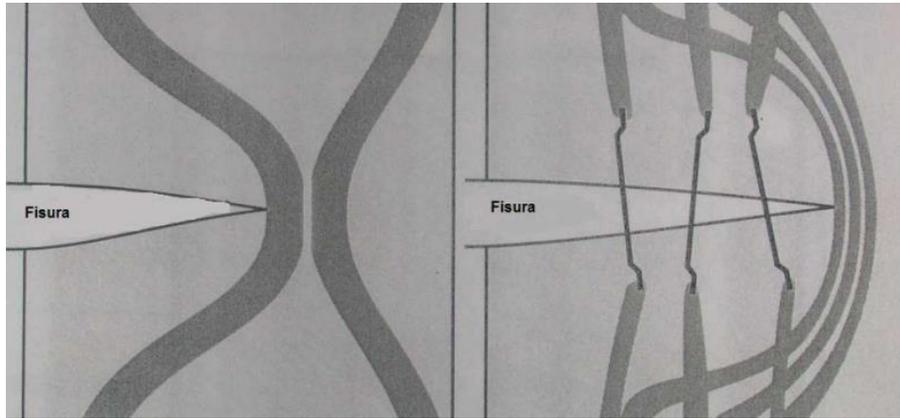


Figura 102. Fisura en concreto convencional (izquierda); fisura en concreto reforzado con fibras.  
Fuente: Ramón Badell. [www.bekaert.com/building](http://www.bekaert.com/building). 2016.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

La evidencia experimental indica que la capacidad de disipación de energía aumenta en la medida en que aumenta la dosificación de fibras. Encontrando que las vigas con una dosificación de 1.5% de fibras metálicas disipó 283% más de energía que las del concreto de 21 MPa (3.000 p.s.i.) para una deriva del 2.5 %.

La dosificación de fibras influye en la rigidez inicial de los elementos hasta que alcanzan aproximadamente al 3% de deriva. A partir de ese estado de deriva, la pérdida de rigidez tiende a volverse constante para las distintas dosificaciones de fibras metálicas. No siendo así para la mezcla de concreto convencional que en comparación con cualquiera de UHPC tuvo una rigidez inferior durante todo el ensayo.

Las fibras metálicas dentro de la mezcla de UHPC contribuyen de una forma sustancial, incrementando la resistencia a compresión en la medida en que lo hace la dosificación de fibras. Los resultados de las vigas ensayadas con dosificaciones del 0.5%, 1.0%, 1.5% y 1.5% FC de fibras metálicas y con materiales colombianos, alcanzaron incrementos de resistencia del 494%, 594%, 600% y 513% respetivamente, en comparación con las vigas de concreto convencional (21 MPa).

Al realizar los ensayos de las vigas con distintos tipos de combinación de fibras se concluyó que la combinación en la cual se utilizó el 50% de fibras largas y el 50% de fibras cortas, obtuvo una mayor resistencia a la flexión.

La fibra corta OL 13/0.20 y fibra larga 3D dramix 60/80 con una combinación del 50-50 para un 1.5% de dosificación de fibras es una proporción ideal para mantener capacidad de disipación de energía en los elementos y mantener la manejabilidad. Dosificaciones por encima de 1.5% no son recomendables para vaciado "in situ" puesto que constructivamente se evidenció que la manejabilidad es inversamente proporcional a la dosificación de fibras dentro de la mezcla, es decir, a mayor dosificación de fibras menor es su trabajabilidad.

Para la capacidad de disipación de energía, no solo es importante la dosificación de fibras sino también la distribución de las mismas dentro del elemento a evaluar. Debido a esto, las vigas con dosificación de fibras metálicas del 0.5% disiparon mayor energía que las de 1.0% ya que presentaron mayor cantidad de fibras largas en el perímetro de la sección transversal, en cambio, la concentración de las fibras metálicas en las vigas cuya proporción era del 1.0%, se localizaban en el núcleo del elemento, cerca al eje neutro.

La evolución de las fisuras ante cargas cíclicas es diferente en ambos lados de las vigas. Esto se debe a que la carga aplicada por el actuador dinámico es solo aplicada de un solo lado. Además, los ensayos de cargas cíclicas son por desplazamientos controlados y no por fuerza controlada.

La dosificación de fibras metálicas permite tener mayor control sobre el desarrollo de la fisuración en los elementos estructurales. Además, restringe el movimiento y aparición de rótulas plásticas a desplazamientos pequeños.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Tener en cuenta que a medida que se aumenta la dosificación de fibras metálicas en la mezcla, disminuye su manejabilidad.

Realizar mayor número de ensayos para vigas del 2% con fibra corta, y para vigas de UHPC sin adición de fibras.

Estudiar la adherencia de las barras de acero de refuerzo con UHPC sin fibras.

Evaluar el aporte de la resistencia a compresión de la arena silícea con dosificaciones bajas de fibras metálicas.

Se recomienda no pintar los elementos con pinturas a base de aceite o agua si se va a medir la fisuración en dichos elementos, puesto que la pintura puede esconder ciertas fisuras.

## CAPÍTULO VI: REFERENCIAS

Aguilar, Ana María y Geovanny Bedoya. 2008. "COLOMBIA Informe de análisis inventario de pérdidas por desastres". *Corporación OSSO*. V.1.8. 28-29.

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). 2010. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10). Bogotá, Colombia.

ATC (Applied Technology Council) (1996), ATC40. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Vol. 1. Seismic Safety Commission. California, USA.

ASTM (American Society for Testing and Materials) E2126. Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings.

Bandell, Ramón. 2014. "Reforzando el futuro". Brochure de *Bekaert*. [www.bekaert.com/building](http://www.bekaert.com/building).

Buitelaar, Peter. 2004. "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years". Plenaria del *Simposio Internacional acerca de UHPC*, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2004.

Cardona, Liliana, Lina Gaviria, Maria Leon, Hermida German, Juan Carlos Acero, Jorge Torres, Sebastian Lopez, Omar Silva y Roberto Rodrigo. 2010. "Evaluación de la absorción de energía (tenacidad) de concreto reforzado con fibra". *Noticreto*. N°98. 54-57.

Catalá, Enrique Alario. 2012. "Fisuras No Estructurales en Elementos de Hormigón". <http://www.enriquealario.com/fisuras-no-estructurales-en-elementos-de-hormigon/> (consultada el 17 de Febrero de 2016).

De Larrard, François. 1999. "Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series". Vol. 9. 421. E&FN SPON, London.

EFNARC (1996), European specification for sprayed concrete. Apartado 10.3.

Espinoza, Ana. 2010. "Estudio de dosificación de hormigón de ultra-alta resistencia, basado en el empaquetamiento de los áridos". Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid.

Ganesan, Namasivayam, Indira y Ruby Abraham. 2007. "Steel fibre reinforced high performance concrete beam-column joints subjected to cyclic loading". *ISET Journal of Earthquake Technology*. Vol. 44, No. 3-4. 445-456.

Graybeal, B. A., y Hartmann, J. L. Enero, 2003. "Ultra-High-Performance Concrete Material Properties," *Proceedings of the Transportation Research Board Conference*, Portland, OR.

Graybeal, Benjamin. 2008. "Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder". *JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING* © ASCE. Vol. 13. 602-610.

Graybael, Benjamin. 2011. "Ultra High Performance Concrete". Technote. FHWA-HRT-11-038. 1-8.

Graybael, Benjamin. 2013. "Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community". FHWA-HRT-13-060. 1,13.

Graybeal, Benjamin y Marshall Davis. 2008. "Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete". *ACI Materials Journal*. N° 105-M68. 603-609.

Güvensoy, Gözde, Fikret Bayramov, Alper Ilki, Cengiz Sengül, Mehmet Ali Tasdemir, Necip Kocatürk y Mehmet Yerlikaya. 2004. "Mechanical Behavior of High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites under Cyclic Loading Condition". Ponencia del *Simposio Internacional acerca de UHPC*, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2004, pp. 649-660.

Huiñapi P., César. "Propiedades principales del concreto fresco". [https://www.academia.edu/7813086/PROPIEDADES\\_PRINCIPALES\\_DEL\\_CONCRETO\\_FRESCO](https://www.academia.edu/7813086/PROPIEDADES_PRINCIPALES_DEL_CONCRETO_FRESCO) (consultada el 17 de Febrero de 2016).

ICONTEC. NTC4025. Norma Técnica Colombiana. 2006. Concretos. Método de ensayo para determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a la compresión.

ICONTEC. NTC673. Norma Técnica Colombiana. 2010. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

Magureanu, Cornelia, Ioan Sosa, Camelia Negrutiu y Heghes Bogdan. 2012. "Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete". *ACI Materials Journal*. Vol. 109 No. 3. 177-183.

Mirmiran, Amir y Pedram Zohrevand. 2012. "Cyclic Behavior of Hybrid Columns Made of Ultra High Performance Concrete and Fiber Reinforced Polymers". *ACI Structural Journal*. Vol 16-No. 1. 91-99.

Mirmiran, Amir y Pedram Zohrevand. 2013a. "Effect of Column Parameters on Cyclic Behavior of Ultra-High-Performance Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes". *ACI Structural Journal*. 110-S68. 828-832.

Mirmiran, Amir y Pedram Zohrevand. 2013b. "Seismic Response of Ultra-High Performance Concrete-Filled FRP Tube Columns". *Journal of Earthquake Engineering*. N° 17. 155–170.

NRMCA. National Ready Mixed Concrete Association. "El Concreto en la Práctica ¿Qué, por qué y cómo?". <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/cip5es.pdf> (consultada el 17 de Febrero de 2016).

Roland Bornemann y Silvan Faber. 2004. "UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading". Procedimiento dentro del *Simposio Internacional acerca de UHPC*, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2004, pp. 673-681.

Ruiz, Daniel, Logreira, Laura, Claudia Ramirez y María P. León, 2015. "Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la aplicación de cargas cíclicas". Tesis de Pregrado. Pontificia Universidad Javeriana.

Schmidt, Michael y Ekkhard Fehling. (2005). "Ductal® Seonyu footbridge TMD for better comfort, Footbridge 2002". Congreso Internacional de Puentes peatonales, París, Francia, noviembre, 2002.

Safeer Abbas, Ahmed M. Soliman y Moncef L. Nehdi. 2015. "Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages". *Construction and Building Materials*. N° 75. 429–441.

Segura, Jorge, Juan E. Velez, y Andrea Medina. 2012. "Concreto de alto desempeño en edificios". *Noticreto*. N° 114. 60-65.

Shao, Yutian y Amir Mirmiran. 2005. "Experimental investigation of cyclic behavior of concrete-filled fiber reinforced polymer tubes". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 9 No.3. 263-273

Sonzogni, Victorio. Recuperado 2015. "Modelos numéricos del comportamiento histerético y estimación del daño estructural en pórticos sismorresistentes de hormigón armado". Ponencia presentada en el Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC). UNL-CONICET. Santa Fe-Argentina.

Srinivas Murthy, Rakesh. 2009. "Design of joints for laterally loaded UHPC columns". Tesis de Maestría, Universidad Estatal de Iowa.

Weichen Xue, Liang Li, Bin Cheng y Jie Li. 2008. "The reversed cyclic load tests of normal and pre-stressed concrete beams". *Engineering Structures*. N°30. 1014-1023.

Weichen Xue, Bin Cheng, Renguang Zheng, Liang Li y Jie Li. 2011. "Seismic Performance of Nonprestressed and Prestressed HPC Frames under Low Reversed Cyclic Loading". *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING* © ASCE. Vol. 137. 1254-1262.

Wu, Zemei, Caijun Shi, Wen He y Linmei Wu. 2016. "Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete". *Construction and Building Materials*. Vol. 103. 8-14.

Yoo, Doo-Yeol, Nemkumar Banthia y Young-Soo Yoon. 2016. "Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars". *Engineering Structures*. Vol. 111. 246-262.

Yu, Rui, Przemek Spiesz y H.J.H. Brouwers. 2014. "Static properties and impact resistance of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPHFRC): Experiments and modeling". *Construction and Building Materials*. Vol. 68. 158–171

Zampini, Davide. 2014. "Concreto de ultra-alto desempeño: Evolución en los materiales reforzados con fibras". *Noticreto*.127. 54-55.