



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNIONES MURO – LOSA DE CONCRETO REFORZADO CON
FIBRAS DE ACERO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HÉCTOR MIGUEL HERNÁNDEZ SOLÍS

TUTOR PRINCIPAL
DR. SERGIO MANUEL ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COTUTOR
DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CD. MX. OCTUBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: **Dr. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ**

Secretario: **Dr. DAVID MURIÀ VILA**

Vocal: **Dr. SERGIO MANUEL ALCOCER MARTÍNEZ DE CASTRO**

1^{er} Suplente: **Dr. CARLOS MÁXIMO AIRE UNTIVEROS**

2^{do} Suplente: **Dr. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES. INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Sergio Manuel Alcocer Martínez De Castro

FIRMA

Para Aurora

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en ingeniería en sus instalaciones.

Al **Instituto de Ingeniería UNAM**, por haberme brindado todas las facilidades posibles para la realización de esta tesis.

Al **Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y a todo el personal del Laboratorio de Estructuras Grandes**, por haberme brindado todas las facilidades posibles para la realización de esta tesis.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico recibido durante mis estudios de maestría y durante la realización de esta tesis.

Al **Dr. Sergio Alcocer**, por su disposición e interés en la dirección y revisión de esta tesis, y sus valiosos comentarios hechos a lo largo de este proyecto que permitieron enriquecerlo.

Al **Dr. Héctor Guerrero**, por su tiempo, dedicación y enorme impulso en el desarrollo de este proyecto. Además de sus correcciones a esta tesis, enseñanzas, su paciencia, su confianza e innumerables consejos para ser un mejor profesionalista y un mejor ser humano.

Al **equipo de becarios y servicio social a cargo del Dr. Guerrero**, por su tiempo y apoyo a lo largo de la realización de este proyecto.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados de un programa experimental de *uniones muro – losa de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA)*. Hasta la fecha se han realizado ensayos en tres de un total de siete especímenes. El primer espécimen ensayado (*Control*) constó de refuerzo convencional (refuerzo con barras corrugadas) tanto en el muro como en la losa, y sirve de referencia para fines de comparación. El segundo espécimen ensayado (*Híbrido*) constó de refuerzo convencional (aproximadamente la mitad del espécimen *Control*) y una dosificación de fibras de acero de 30 kg/m³, nuevamente el refuerzo es el mismo tanto en el muro como en la losa. El tercer espécimen ensayado (*Fibras 1*) constó sólo de refuerzo con fibras con la misma dosificación que el espécimen *Híbrido*. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes del *Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)*. Durante las pruebas, se aplicó carga cíclica reversible en los especímenes de manera cuasi-estática. Las pruebas fueron controladas por desplazamiento hasta llegar a la falla. Se comparan los resultados en términos de resistencia y capacidad de deformación de los tres especímenes. Se discuten los resultados frente a algunos resultados que se han obtenido en investigaciones relacionadas.

ABSTRACT

Results of an experimental program of *Wall – slab joints made of concrete reinforced with steel fibers (SFRC)* are presented. To date, tests have been conducted on three out of seven specimens. The first specimen tested (*Control*) consisted of conventional steel bar reinforcement (both in the wall and in the slab, and serves as a reference for comparison purposes). The second specimen (*Hybrid*) consisted of less steel bar reinforcement and a steel fiber dosage of 30 kg/m³. Again, the reinforcement is the same in both the wall and the slab. The third specimen (*Fibers 1*) was made with concrete with steel fibers only with the same dosage as the Hybrid specimen. Tests were carried out in the Large Scale Structures Laboratory of the *National Center for Disaster Prevention (CENAPRED)*. During the tests, reversible cyclic loading on the specimens was applied quasi-statically. The tests were displacement controlled until was fault reached. Comparisons in terms of strength and deformability among the three specimens are presented. Discussion with some results that have been obtained in related investigations is provided.

CONTENIDO

1 Introducción	1
<i>Justificación</i>	1
<i>Objetivos</i>	1
<i>Organización de la tesis</i>	1
2 Revisión Bibliográfica	2
<i>Introducción a las fibras de acero como refuerzo del concreto</i>	2
<i>Comportamiento del CRFA</i>	4
<i>Muros de CRFA</i>	10
<i>Losas de CRFA</i>	14
<i>Uniones muro – losa de CRFA</i>	15
<i>Uniones viga – columna de CRFA</i>	19
3 Configuración del Experimento	23
<i>Estructura prototipo</i>	23
<i>Características de los especímenes</i>	25
Geometría	25
Materiales utilizados	28
Refuerzo	28
Carga axial en muros	33
Cargas sobre la losa.....	33
<i>Instrumentación</i>	37
<i>Protocolo de carga</i>	39
<i>Arreglo experimental</i>	40
<i>Detalles de colado de los especímenes</i>	47
4 Resultados Experimentales	48
<i>Testigos</i>	48
Barras de presfuerzo	48
Cilindros de concreto	49
Vigas de CRFA.....	51
<i>Especímenes ensayados</i>	53
Condiciones iniciales	53
Curvas cortante – distorsión	54
Configuración deformada de los especímenes	55

Evolución de grietas registradas	59
Daño visual en los especímenes.....	63
Contribución de las fibras a la resistencia del concreto.....	65
<i>Inspección visual post-prueba</i>	66
5 Discusión	69
<i>Ensayos de cilindros de concreto</i>	69
<i>Ensayos de vigas de CRFA</i>	70
<i>Especímenes ensayados</i>	71
6 Conclusiones	75
7 Referencias	76
8 Apéndices	79
<i>Apéndice A. Detalles de armados</i>	79
<i>Apéndice B. Numeración y características de la instrumentación</i>	80
<i>Apéndice C. Bitácoras de ensayo</i>	81

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Fibras utilizadas en los ensayos (Créditos: Adrián López)</i>	3
<i>Figura 2. Geometría de la estructura prototipo (dimensiones en m)</i>	23
<i>Figura 3. Espectro de diseño – PRODISIS (Acapulco de Juárez, Edo. de Guerrero)</i>	24
<i>Figura 4. Sub-ensamblaje de unión muro – losa</i>	25
<i>Figura 5. Geometría de los especímenes a ensayar (dimensiones en cm)</i>	26
<i>Figura 6. Compatibilidad de deformaciones</i>	30
<i>Figura 7. Comparación de resultados</i>	33
<i>Figura 8. Componente de ductilidad en la resistencia a cortante para diseño de elementos nuevos de concreto bajo flexión uniaxial</i>	34
<i>Figura 9. Diagrama Momento – Curvatura de la losa</i>	36
<i>Figura 10. Cortante por flexión y cortante resistente</i>	37
<i>Figura 11. Instrumentación del espécimen vista sobre la cara posterior</i>	38
<i>Figura 12. Historia de desplazamientos en LVDT H4</i>	40
<i>Figura 13. Esquema general de prueba</i>	40
<i>Figura 14. Bases con marcos de concreto (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	41
<i>Figura 15. Rodillo de acero bajo el cabezal inferior (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	42
<i>Figura 16. Gato hidráulico superior con placas de confinamiento (Créditos: Luis Morales)</i>	42
<i>Figura 17. Instalación de micrómetros en el muro superior (Créditos: Juan Gómez)</i>	43
<i>Figura 18. Instalación de LVDT a lo largo de la losa (Créditos: Luis Morales)</i>	43
<i>Figura 19. Instalación de LVDT en el muro superior</i>	44
<i>Figura 20. Instalación de LVDT en el muro inferior (Créditos: Juan Gómez)</i>	44
<i>Figura 21. Instalación de las barras de presfuerzo en el muro</i>	45
<i>Figura 22. Colocación de los lingotes sobre la losa (Créditos: Eduardo Martínez)</i>	46
<i>Figura 23. Esquema de prueba</i>	46
<i>Figura 24. Colocación de barras de seguridad (Créditos: Eduardo Martínez)</i>	47
<i>Figura 25. Ensayo de barras de presfuerzo (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	48
<i>Figura 26. Curvas esfuerzo – deformación de barras de presfuerzo</i>	49
<i>Figura 27. Ensayo de cilindros de concreto</i>	50
<i>Figura 28. Curvas esfuerzo – deformación de cilindros de concreto</i>	50
<i>Figura 29. Ensayo de vigas de CRFA (Créditos: Luis Morales)</i>	52
<i>Figura 30. Curvas esfuerzo – ductilidad de desplazamiento de vigas de CRFA (30 kg/m³)</i>	52

<i>Figura 31. Grietas previas a los ensayos (vista desde abajo)</i>	53
<i>Figura 32. Curvas histeréticas cortante – distorsión</i>	54
<i>Figura 33. Envoltentes del comportamiento histerético cortante – distorsión</i>	54
<i>Figura 34. Deformada de especímenes a distintos niveles de distorsión</i>	56
<i>Figura 35. Deformada de especímenes a 2% de distorsión</i>	57
<i>Figura 36. Especímenes deformados en su último incremento de desplazamiento (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	58
<i>Figura 37. Agrietamiento en espécimen Control</i>	60
<i>Figura 38. Agrietamiento en espécimen Híbrido</i>	61
<i>Figura 39. Agrietamiento en espécimen Fibras 1</i>	62
<i>Figura 40. Comparación de grietas más anchas entre los especímenes</i>	63
<i>Figura 41. Daño visual a 0.5% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	64
<i>Figura 42. Daño visual a 1.0% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	64
<i>Figura 43. Daño visual a 2.0% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	64
<i>Figura 44. Efectos de la fibra en el concreto de la superficie</i>	65
<i>Figura 45. Envoltentes positivas cortante – distorsión de especímenes</i>	65
<i>Figura 46. Colocación cuatrapeada del armado de la losa del espécimen Control</i>	66
<i>Figura 47. Profundidad real del armado de losa</i>	67
<i>Figura 48. Distribución aleatoria de fibras en el concreto</i>	68
<i>Figura 49. Curvas esfuerzo – ductilidad de desplazamiento; experimentales, teóricas y propuesta de Carrillo et al. (2016) para el CRFA</i>	70
<i>Figura 50. Comparación de fibras de series 3D, 4D y 5D (Bekaert, 2012)</i>	70
<i>Figura 51. Envoltentes del comportamiento histerético cortante – distorsión y modelo elasto-plástico</i>	71
<i>Figura 52. Modo de falla del espécimen Control (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	73
<i>Figura 53. Modo de falla del espécimen Híbrido</i>	73
<i>Figura 54. Modo de falla del espécimen Fibras 1 (Créditos: Héctor Guerrero)</i>	74

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. Cargas vivas unitarias en kg/m².....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Combinaciones de diseño.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 4. Resultados del análisis de la estructura prototipo.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5. Elementos mecánicos actuantes sobre el muro y la losa del espécimen.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Resistencia del muro del espécimen.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 7. Resistencia de la losa del espécimen.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 8. Propiedades de la fibra.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 9. Refuerzo de especímenes.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 10. Momentos y curvaturas de condiciones de agrietamiento, fluencia y última de la losa ..</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 11. Resultados de ensayos de barras de presfuerzo.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 12. Resultados de ensayos de cilindros de concreto.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 13. Resultados de ensayos de vigas de CRFA.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 14. Cortantes máximos en los especímenes.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 15. Cortantes correspondientes a los niveles de distorsión 0.5%, 1.0% y 2.0% (t).....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 16. Resultados experimentales y teóricos de los ensayos de cilindros de CRFA.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 17. Degradación de resistencia en los especímenes.....</i>	<i>71</i>

1 INTRODUCCIÓN

Justificación

En una porción amplia del territorio nacional y en muchos países, los edificios son sometidos a efectos sísmicos severos, los cuales generan fuerzas cortantes sobre elementos estructurales verticales que pueden poner en riesgo su seguridad, a tal grado que pueden generar colapso total de este tipo de estructuras. En edificios es conveniente utilizar muros para resistir estas fuerzas y mejorar el comportamiento estructural al reducirse las demandas de desplazamiento. Algunas investigaciones (Carrillo *et al.*, 2016) demuestran que muros de *concreto reforzado con fibra de acero (CRFA)* para vivienda de baja altura tienen un comportamiento satisfactorio ante demandas sísmicas intensas. Sin embargo, no se ha encontrado evidencia sobre estudios experimentales de la unión hecha de CRFA entre muros y losas como tal. Es por esto que es de gran interés entender el comportamiento de estas uniones ante cargas laterales. Esta unión debe tener la suficiente capacidad resistente y de deformación para transmitir la fuerza de inercia generada en las losas a los muros, de modo que se pueda resistir el cortante sísmico hasta la cimentación.

Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general entender la capacidad de carga y de deformación de *uniones muro – losa de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA)* sometidas a cargas cíclicas reversibles para distintas dosificaciones de fibras.

Los objetivos particulares son:

- Conocer el comportamiento de estas uniones ante cargas laterales (sísmicas).
- Conocer el comportamiento histerético de estas uniones.
- Comparar contra otras investigaciones previas relacionadas con el tema.

Organización de la tesis

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de los resultados que se han obtenido de investigaciones relacionados con *uniones muro – losa de CRFA* desarrolladas hasta el momento, para poner en contexto y dar lugar a las actividades de investigación realizadas.

En el capítulo 3 se describen las características de una estructura prototipo propuesta para poder estudiar las *uniones muro – losa de CRFA* y se presentan los resultados de su análisis. Así mismo, se describe el origen y características de los especímenes ensayados, y se determinan las variables de estudio y el esquema de los ensayos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos, además de los resultados de algunas pruebas realizadas a los materiales utilizados en la construcción de los especímenes.

Después, en el capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos y las investigaciones que se han realizado con respecto a CRFA. También, en el capítulo 6 se ofrecen algunas conclusiones que se obtuvieron con base en el presente trabajo de investigación.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Antes de presentar los resultados obtenidos de investigaciones anteriores, se ofrece una introducción a las fibras como refuerzo del concreto.

Introducción a las fibras de acero como refuerzo del concreto

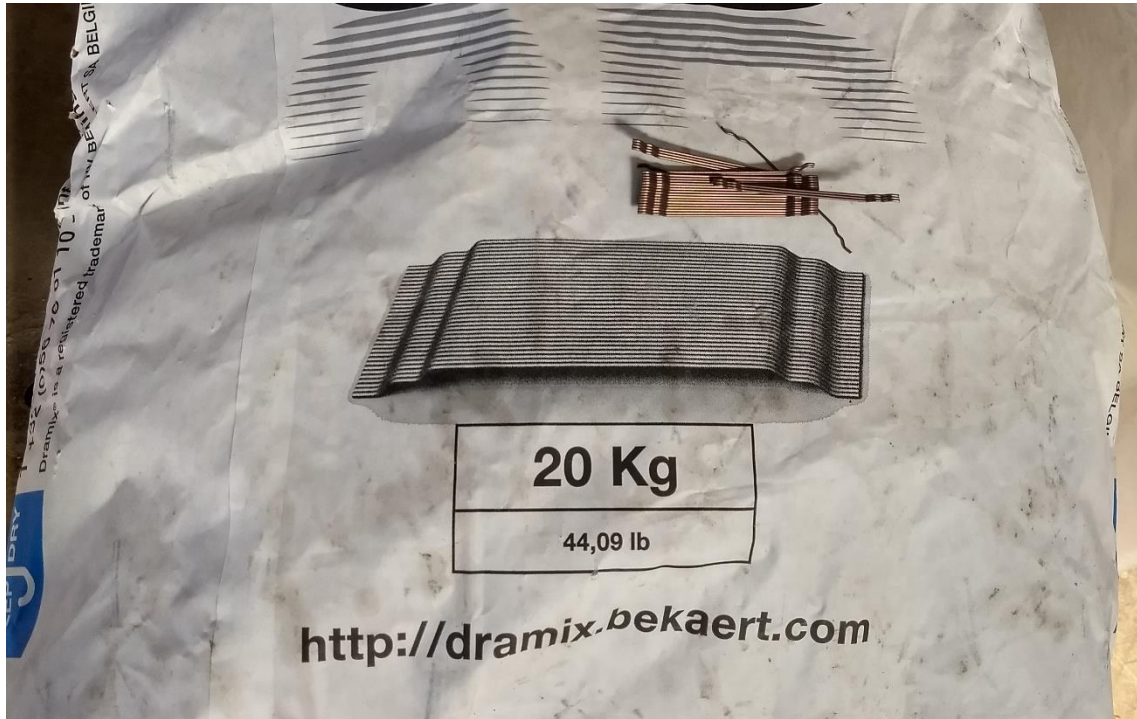
El concreto tiene tantas ventajas y tantos argumentos a su favor que es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción. Sin embargo, el concreto tiene varias desventajas; es pesado, tiene una relación muy baja entre su resistencia a tensión y compresión, su relación peso – resistencia es excesivamente alta, su capacidad para absorber energía antes de la rotura es baja, su durabilidad es muy sensible a su proyecto y ejecución, etc.

Últimamente han sido muchos y grandes los esfuerzos encaminados a mejorar el comportamiento estructural del concreto mediante el empleo de nuevos cementos, la utilización de nuevas técnicas de puesta en obra que permitan rebajar la relación agua – cemento (mejorando al mismo tiempo la compacidad), el empleo de nuevas adiciones y/o superplastificantes o por último, mediante tecnologías nuevas que permitan lograr concretos más isótropos y en los que inconvenientes, como los antes apuntados, queden reducidos. Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentra, en un lugar muy destacado, el empleo de fibras (metálicas o sintéticas) para reforzar o armar al concreto.

Las fibras empleadas en el concreto reforzado son discontinuas, presentando una distribución discreta y uniforme que confiere al material una gran isotropía y homogeneidad. La efectividad del refuerzo y la eficacia en la transmisión de tensiones depende de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza y del tipo de fibra empleado, así como de su módulo de elasticidad y su resistencia a la tensión, entre las más importantes.

Las fibras metálicas, concretamente las de acero Dramix, son las que más se emplean en el refuerzo de concretos por su buen comportamiento y su relación calidad – precio (Bekaert, 2012). El acero posee un módulo de elasticidad diez veces superior al del concreto, además las fibras de acero tienen una buena adherencia a la pasta y un alto alargamiento de rotura.

Las fibras de acero pueden obtenerse por diferentes métodos, el más común consiste en fabricarlas por corte de alambre trefilado de acero de bajo contenido en carbono. El diámetro de los alambres está comprendido entre 0.25 y 1.00 mm. La longitud de las fibras puede ser muy variable, oscilando entre 10 y 75 mm. El uso de fibras derechas y lisas casi ha desaparecido y las fibras modernas tienen, ya sea superficies rugosas, extremos en gancho, o son rizadas u onduladas en su longitud. Algunas fibras son juntas para formar manojos usando goma soluble al agua para facilitar el manejo y el mezclado.



a) Presentación de fibras



b) Muestra de fibras

Figura 1. Fibras utilizadas en los ensayos (Créditos: Adrián López)

Para los ensayos realizados en este proyecto se usaron fibras con extremos en gancho, juntadas en manojos (encoladas) de 20 a 40 fibras (Figura 1).

A efectos de comparación de unas fibras con respecto a otras, se ha establecido un parámetro numérico denominado *relación de aspecto*. La relación de aspecto o esbeltez de una fibra es la relación que existe entre la longitud de la misma y su diámetro equivalente, es decir, el diámetro del círculo cuya sección es equivalente al área transversal de la fibra. Las relaciones de aspecto normales oscilan entre 30 y 150.

Comportamiento del CRFA

Chao *et al.* (2009) investigaron experimentalmente el comportamiento de enlace de las barras de refuerzo incrustadas en varios tipos de compuestos de cementos reforzados con fibras. Se evaluaron los *compuestos de cemento reforzado con fibra de alto rendimiento (HPFRCC* por sus siglas en inglés *High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites*), *concreto simple (CS)* y concreto con refuerzo transversal en espiral. Las muestras de prueba consistieron en una barra de refuerzo (#5 o #8) incrustada en un prisma compuesto de cemento sometido a una carga cíclica unidireccional, monótona creciente o cíclica reversible. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Los efectos de confinamiento proporcionados por las fibras en materiales compuestos de cemento reforzado con fibras después del agrietamiento pudieron limitar eficazmente el ancho de la fisura, lo que condujo a una mayor resistencia de unión de las barras de refuerzo incrustadas en dichos materiales compuestos, en comparación con las matrices de CS. Las muestras con HPFRCC condujeron al mejor comportamiento de adherencia en términos de resistencia de adherencia y capacidad de retención de rigidez, así como de capacidad de control de daños.
- La resistencia del enlace en especímenes de HPFRCC sometidos a carga monótona fue tan alta como 1.5 veces la de las muestras reforzadas en espiral. Por lo tanto, con la misma cantidad de refuerzo (fracción de volumen), las fibras en HPFRCC son más efectivas que el refuerzo transversal convencional para mejorar la resistencia de la unión, así como para el control de agrietamiento.
- El comportamiento de adherencia de especímenes con refuerzo en espiral convencional ($\rho_s = 2\%$) fue inferior al de muestras de HPFRCC bajo carga cíclica unidireccional. El nivel de tensión de adhesión alcanzado fue menor (aproximadamente el 60% del de las muestras con un contenido de fibra del 2%) y el deslizamiento residual fue más de cinco veces mayor con los mismos niveles de tensión. El número de ciclos de carga que las muestras de HPFRCC sostuvieron sin degradación de rigidez de adherencia fue aproximadamente tres veces mayor que el de las muestras reforzadas en espiral. El desconchamiento y la fracturación del concreto contribuyeron al comportamiento inferior del enlace de las muestras con espirales.
- El comportamiento de adherencia de las barras de refuerzo bajo carga cíclica reversible también se pudo mejorar significativamente utilizando materiales de HPFRCC. La energía acumulada disipada por la muestra de HPFRCC fue aproximadamente 22 veces mayor que

la de la muestra de CS y 2.5 veces la de la muestra reforzada en espiral ($\rho_s = 2\%$). Las muestras de HPRCC sufrieron una tensión de adherencia de aproximadamente 10 MPa (1.45 ksi) durante 20 ciclos de carga reversible (#8), mientras presentaron un deslizamiento residual, un ancho de grieta y un daño global relativamente pequeños.

- Los resultados de la prueba sugieren que la aplicación de HPRCC puede reducir en gran medida la longitud de desarrollo de las barras deformadas en los miembros de concreto armado.

Mármol (2010) hizo una recopilación de ensayos obtenidos del concreto con fibras (acero, vidrio y polipropileno) de diversas fuentes de investigación y tesis doctorales para comparar sus resultados y características mecánicas. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- En función del tipo de fibra se mejoran, en general, las características mecánicas del concreto.
- Las fibras de acero son más costosas (en comparación con las fibras de vidrio y polipropileno), disminuyen la trabajabilidad del concreto y pueden dar lugar a la formación de erizos (bolas de fibras sin concreto en su interior), lo que no limita su utilización.
- La longitud de la fibra debe ser siempre superior a la longitud crítica (longitud mínima de fibra embebida en la matriz de concreto) para mantener la ductilidad del concreto.
- La adherencia fibra – matriz influye en la ductilidad a la rotura, por lo que debe evitarse que la fibra se rompa antes de que se deslice.
- Es conveniente aumentar la proporción de arena con relación a la grava y utilizar siempre plastificantes.
- En caso de posibilidades de corrosión, se pueden utilizar fibras galvanizadas y en casos de temperaturas altas (1,200 °C) es necesario el uso de fibras de acero inoxidable.
- A compresión, las fibras en el concreto cambian el comportamiento de una rotura frágil a una dúctil; sin embargo, el aumento de resistencia a compresión no es muy apreciable.
- En flexotensión, su resistencia aumenta y cambia el comportamiento de una rotura frágil a una dúctil.
- Al tener una rotura a flexotensión dúctil, se aumenta la tenacidad y la resistencia a la fatiga.
- La resistencia al impacto incrementa y se reduce el número de fragmentos desprendidos.
- La resistencia a cortante permite un comportamiento dúctil y en caso de terremotos disminuyen los daños en las estructuras.
- La presencia de fibras permite una mejor redistribución de las micro-fisuras y de las fisuras.
- Hasta la fecha no se ha conseguido un control de calidad en obra de manera fiable.
- Los concretos con fibras de acero pueden trabajar estructuralmente pero no sustituyen al acero convencional de manera total.

Carrillo *et al.* (2013) realizaron un programa experimental que incluyó el ensayo de 128 especímenes en forma de cilindros (88 especímenes) y vigas (40 especímenes). Seleccionaron tres tipos de fibras de la marca *Dramix* con relaciones de aspecto de 55, 64 y 80. Utilizaron cinco dosificaciones: 0, 40, 45, 60 y 75 kg/m³. Determinaron las propiedades mecánicas del CRFA sometido a esfuerzos de

compresión, tensión y flexión, y propusieron correlaciones numéricas para estimar las propiedades básicas. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Propusieron correlaciones numéricas para estimar propiedades mecánicas básicas como: resistencia máxima y deformación en compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson y resistencia a tensión indirecta. También lo hicieron para propiedades como: resistencia de agrietamiento, capacidad de deformación y capacidad de disipación de energía o tenacidad.
- La trabajabilidad del concreto disminuyó significativamente a medida que se incrementó la cantidad de fibras en el concreto, especialmente cuando se utilizaron fibras con longitud igual a 60 mm.
- El peso específico en estado endurecido no varió significativamente al aumentar el contenido de fibras, pues la disminución de agregado grueso se compensó con la adición de fibras de acero.
- A medida que se incrementó el contenido de fibras de acero, la resistencia a compresión del concreto disminuyó a un valor casi constante y su capacidad de deformación en compresión aumentó.
- El módulo de elasticidad disminuyó a medida que se incrementó el contenido de fibras de acero. Esta tendencia se genera por la disminución de agregado grueso (sustitución de agregado grueso por arena y fibra de acero), y por el aumento del contenido de aire en la mezcla, el cual crea menor adherencia entre la matriz cementante y la fibra. El aumento de aire se origina porque éste queda atrapado por la disminución de revenimiento del concreto o porque se introduce en el momento del mezclado de las fibras.
- En general, la fibra de acero le proporcionó un efecto de confinamiento al concreto en compresión y, por tanto, a medida que incrementó el contenido de fibras de acero, la relación de Poisson disminuyó a un valor casi constante ($\nu = 0.15$).
- En términos generales, la fibra de acero generó que el concreto se volviera ligeramente menos resistente, pero más dúctil cuando éste se sometió a fuerzas axiales de compresión.
- En cuanto al ensayo de compresión diametral, la resistencia a tensión indirecta del concreto aumentó proporcionalmente con la cantidad de fibras de acero.
- La resistencia al agrietamiento de tensión por flexión o módulo de rotura y la deformación unitaria asociada, no varían significativamente al incrementar el contenido de fibras de acero, pues a partir de este esfuerzo inicia la contribución de las fibras al concreto. Sin embargo, la resistencia máxima a tensión por flexión y su deformación unitaria asociada, así como la tenacidad, sí aumentan proporcionalmente con el contenido de fibras de acero.
- Las resistencias residuales aumentaron significativamente a medida que se incrementó la cantidad de fibras de acero. Este comportamiento demuestra un mejor trabajo de la matriz cementante – fibra, el cual está asociado principalmente a una mejor adherencia entre ambos componentes.

Gallo *et al.* (2013) hicieron una investigación experimental y analítica sobre el comportamiento del CRFA elaborado con fibras ZP-306, sometidas a esfuerzos de compresión. El estudio involucró la

revisión y discusión de los modelos disponibles en la literatura, así como un programa experimental que incluye el ensayo de 48 especímenes. A partir de un análisis de regresión de los datos medidos, propusieron ecuaciones para estimar las principales propiedades mecánicas del CRFA, tales como resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson. Las ecuaciones correlacionan las propiedades mecánicas con las principales características de las fibras de acero, tales como dosificación y relación de aspecto. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- El valor del peso unitario del CRFA permaneció casi constante a medida que incrementó el volumen de fibras en la mezcla. Sin embargo, el contenido de aire aumentó con el incremento del volumen de fibras agregado a la mezcla. Este aire es introducido al momento del mezclado de las fibras con el concreto.
- La resistencia a compresión disminuyó levemente. Esta tendencia se genera por la sustitución de agregado grueso por arena y fibras de acero en la mezcla y por el aumento de contenido de aire incluido en el momento del mezclado. Sin embargo, para propósitos prácticos se puede suponer que la resistencia a compresión del CRFA es igual que la resistencia del CS.
- Las fibras de acero le generaron un efecto de confinamiento al concreto, ya que, al incrementar el contenido de fibras, disminuyó la relación de Poisson.
- Se considera que los modelos de predicción disponibles en la literatura para estimar la resistencia a la compresión del CRFA son de aplicación sencilla, ya que las ecuaciones incluyen ecuaciones fácilmente identificables por el diseñador.
- Las ecuaciones de los modelos disponibles en la literatura para predecir la curva esfuerzo – deformación tienen un formato práctico. Las variables usadas incluyen el efecto de las fibras en la forma de la curva. Sin embargo, la dispersión de los resultados de la deformación es significativamente alta. Por tanto, en estudios experimentales futuros se debe incluir la medición de la curva completa esfuerzo – deformación del CRFA sometido a esfuerzos de compresión, para así plantear una ecuación que se ajuste a las tendencias de los materiales de construcción del país.
- Las ecuaciones propuestas para estimar la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson dependen de parámetros básicos de diseño; por tanto, se considera que el formato de las ecuaciones es práctico y versátil para ser incluidas en un reglamento de diseño. Además, la predicción de las ecuaciones propuestas es acertada, y la variación sobre predicción de los datos es baja.

López (2015) evaluó, mediante los resultados obtenidos de un estudio experimental, la influencia que tiene dos tipos particulares de fibras; fibras de acero y macrofibras de polipropileno, en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, cuando dichas fibras se emplean en diferentes porcentajes volumétricos iguales o menores al 1% en mezclas de concreto fabricadas con agregados traídos del Edo. de México y del Edo. de Hidalgo. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La trabajabilidad del concreto se reduce de forma proporcional al consumo de fibras. La prueba de cono invertido resulta adecuada para controlar en campo la trabajabilidad de estas mezclas.
- La inclusión de fibras de acero en las mezclas de concreto ayuda de manera sustancial a disminuir la aparición de grietas por contracción plástica; conforme se aumenta el consumo de fibra se logra disminuir en número, espesor y longitud las grietas.
- Comparando el desempeño, en cuanto a resistencia a compresión del concreto con fibras con el concreto sin fibras, a la edad de 28 días, la resistencia a compresión no se modifica en forma importante al agregar las fibras de acero; para 90 días de edad, la resistencia disminuye hasta un 9% para la mezcla con un consumo de fibra de 60 kg/m^3 .
- El módulo de elasticidad de los concreto con fibra de acero aumenta 5% en promedio. La relación de Poisson para los concretos con fibras de acero se mantiene casi constante con respecto al mismo concreto, pero sin fibras.
- La resistencia a tensión se incrementa proporcionalmente al consumo de fibra; de la misma forma, el porcentaje que representa la resistencia a tensión con respecto a la de compresión aumenta con el consumo de fibra.
- La resistencia a cortante se incrementa de forma proporcional al consumo de fibra en la mezcla.
- La presencia de fibras de acero en el concreto propicia una mejora notable en la resistencia a la abrasión y la mejora resulta proporcional al consumo de fibra; para el mayor consumo de fibra estudiado se logró reducir el desgaste por abrasión en 34%.
- Es evidente el efecto benéfico que tiene la inclusión de fibras en la resistencia al impacto; las fibras de acero incrementan el número de impactos requeridos para la primera y última grieta. El incremento resulta proporcional al consumo de fibra.
- A la edad de 28 días, la permeabilidad al agua se incrementa para la mayoría de los casos, excepto para el concreto fabricado con un consumo de 40 kg/m^3 de fibra de acero. Este incremento se debe a que, a mayor cantidad de fibra, mayor es el contenido de poros. También se observa que la permeabilidad a los 90 días se reduce en forma importante, debido principalmente a que a esa edad ya se encuentra hidratado la mayor parte del cementante y, por lo tanto, se han formado compuestos que llenan los poros.
- Conforme se incrementa el consumo de fibra, la tenacidad aumenta proporcionalmente. Los valores más altos de tenacidad, son los obtenidos con los concretos reforzados con fibras de acero.
- La contracción por secado se reduce conforme se aumenta el consumo de fibra, en relación con la del concreto sin fibras.
- El coeficiente de flujo plástico último se reduce al incluir fibras de acero en el concreto, aunque esta reducción no es proporcional al consumo de fibra adicionada. Los coeficientes de flujo plástico último obtenidos son relativamente altos debido principalmente al tamaño máximo del agregado grueso empleado en la fabricación de las mezclas, que conducen a mezclas con más mortero.
- Los resultados alcanzados en las diferentes pruebas efectuadas permiten concluir que las fibras proporcionan incrementos importantes en la mayoría de las propiedades del concreto

en estado fresco y endurecido. No se debe olvidar que la cantidad máxima de fibras a utilizar queda limitada por la trabajabilidad de la mezcla, por razones de aplicación y de costo – beneficio.

- Para conocer el desempeño de un tipo de fibra particular en una mezcla de concreto, siempre es recomendable realizar un estudio para determinar las propiedades en estado fresco y endurecido, y así verificar si es eficiente y cumple con los requerimientos de la aplicación. La amplitud del estudio dependerá de la aplicación y tipo de proyecto.
- Desde el punto de vista costo – beneficio el consumo de fibras de acero que tuvo mejor desempeño, dentro de los consumos estudiados, fue el de 60 kg/m³.

Nakin *et al.* (2018) determinaron el efecto de las fibras discretas sobre el módulo elástico del concreto y los compuestos de cemento. Investigaron cinco tipos de fibras discretas entre las cuales estuvieron las de acero. Propusieron una nueva ecuación de módulo elástico para estimar mejor el módulo elástico de los *concretos reforzados con fibras (CRF)* con una fracción de volumen de fibra máxima del 10% y la compararon con las ecuaciones existentes de otros códigos, incluidos los estadounidenses, japoneses, coreanos, noruegos y europeos, así como las ecuaciones propuestas por otros investigadores. Estas ecuaciones las evaluaron usando más de 400 puntos de datos tomados del programa experimental y otras literaturas. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Aunque se observaron algunas fluctuaciones (dentro del 10%) en los datos, cuando la relación de agregados gruesos a finos (C/S) fue mayor que 1, las fibras no influyeron en sus propiedades elásticas. Sin embargo, cuando no hubo agregado grueso o cuando $C/S \leq 1$, el módulo elástico disminuyó con una reducción promedio de 20%. Esto podría atribuirse a huecos adicionales provocados por la adición de arena y fibra como se revela en los resultados. Como resultado, las ecuaciones de módulo elástico existentes a partir de los códigos no proporcionarían una buena estimación de la reducción en el módulo elástico.
- Utilizando más de 400 puntos de datos obtenidos del programa experimental y otros 24 estudios de la literatura, se evaluó la precisión de las ecuaciones de módulo elástico existentes. Se determinó que las ecuaciones existentes no proporcionan una buena predicción del módulo elástico de concreto con fibras discretas. En consecuencia, la ecuación propuesta se introdujo para corregir los errores de las ecuaciones existentes. La ecuación propuesta es aplicable a una amplia gama de concreto con variedad de tipos de fibra, C/S, resistencias de concreto y fracción de volumen de fibra entre 0.1% a 10%. Se recomienda utilizar la ecuación propuesta para calcular el módulo elástico de CRF.

$$E_c = 4,700\lambda_{V_f}\sqrt{f'_c} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$E_c = 57,000\lambda_{V_f}\sqrt{f'_c} \quad (\text{lb/in}^2)$$

con:

$$\lambda_{V_f} = 1 \quad \text{si } C/S > 1$$

$$\lambda_{V_f} = \frac{1 + 0.7^{V_f}}{2} \quad \text{si } \frac{C}{S} \leq 1$$

donde:

- E_c Módulo de elasticidad (unidades indicadas)
- λ_{vf} Factor de fracción de volumen de fibra
- f'_c Resistencia a compresión del concreto (unidades correspondientes a E_c)
- C/S Relación del peso del agregado grueso entre el peso del agregado fino (arena)
- V_f Fracción de volumen de fibras (%).

Muros de CRFA

Athanasopoulou *et al.* (2013) evaluaron el uso del *concreto reforzado con fibras de alta resistencia* (HPFRC por sus siglas en inglés *High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*) en muros estructurales de baja altura como un medio para simplificar los detalles de refuerzo. Probaron cinco muestras de muro bajo de HPFRC en voladizo con una relación de altura – longitud de 1.2 o 1.5 bajo reversiones de gran desplazamiento. Para propósitos de comparación, también probaron cuatro muros de *concreto reforzado* (CR) detallados de acuerdo con las disposiciones sísmicas del ACI 318-05. Los muros de HPFRC tenían poco o ningún refuerzo de confinamiento en los bordes. Sus resultados fueron los siguientes:

- Las muestras de muros de CR, diseñadas de acuerdo con las disposiciones sísmicas de ACI 318-05 y probadas en moderada ($0.51\sqrt{f'_c}$ MPa) y alta ($0.69\sqrt{f'_c}$ MPa) reversiones de fuerza cortante, exhibieron una respuesta de histéresis estable para distorsiones de hasta aproximadamente 2.3% y 1.5%, respectivamente. Todos los muros de CR exhibieron una abertura de junta fría entre el muro y la viga de base que provocó un importante deslizamiento del muro durante las últimas etapas de las pruebas, aunque las muestras satisficieron los requisitos de fricción del Código ACI para la transferencia de cortante en la base del muro. El daño se concentró en la parte inferior de los muros y se caracterizó por aplastamiento del concreto y grietas divisorias verticales en las regiones de borde del muro, o trituración del concreto sobre el propio muro.
- Los muros de HPFRC de baja altura sometidas a reversiones de fuerza cortante moderada mostraron una respuesta de histéresis estable con capacidades de distorsión del 2.0% al 3.0% a pesar de la eliminación completa del refuerzo de confinamiento en los bordes del muro y de la disminución del refuerzo con respecto a los muros de CR. El uso de HPFRC permitió una disminución significativa en el espaciado (y cantidad) de refuerzo de confinamiento en muros probados bajo altas reversiones fuerza cortante (cuatro veces el espaciado y un cuarto de la cantidad provista en muestras de CR) sin comprometer el comportamiento sísmica del muro.
- El uso de HPFRC condujo a un conjunto mucho más denso de grietas en comparación con los muros de CR, lo que se tradujo en un menor daño para el mismo nivel de distorsión.
- La unión entre la base y el muro es particularmente crítica en los muros bajos de HPFRC porque no hay fibras que atraviesen esa sección, lo que la hace susceptible a la localización de daños y la posible falla prematura por deslizamiento. Por lo tanto, el refuerzo con anclas

debe usarse para fortalecer la junta fría y forzar deformaciones inelásticas dentro del muro de HPFRC.

- Los resultados de la prueba revelaron un aumento casi lineal en la resistencia a cortante con un aumento en el área total de refuerzo vertical para los muros de RC y HPFRC con refuerzo con anclas. El límite inferior de $0.5\sqrt{f'_c}$ MPa para la resistencia a cortante de los muros de poca altura propuesto por Wood (1990) resultó ser consistente con los resultados de la prueba y, basado en los datos de prueba limitados, adecuado para evitar desplazamientos de deslizamiento excesivos.

San Bartolomé *et al.* (2013) efectuaron ensayos de carga lateral cíclica en tres muros a escala reforzados por cortante usando como refuerzo en la zona central barras de refuerzo convencional, fibras de polipropileno (11.5 kg/m^3) y fibras de acero (35 kg/m^3), mientras que el refuerzo dúctil por flexión se mantuvo constante. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Los muros delgados presentaron problemas en el concreto (vacíos y segregación) difíciles de reparar adecuadamente. Estos problemas se deben a la mala compactación del concreto por la alta congestión de refuerzo, por lo que en este proyecto se trató de reemplazar a las barras centrales por fibra, que además disminuye el problema de agrietamiento por contracción, pero la resistencia máxima a cortante quedó afectada.
- Los pequeños vacíos y segregación de agregados presentados en la base de los especímenes de este proyecto, se debieron a la falta de hermeticidad de la cimbra y no a la congestión del refuerzo. Antes de efectuarse el experimento, estos defectos se repararon superficialmente, como a veces se hace en obra, pero la rigidez lateral inicial quedó afectada.
- Las fibras mantuvieron constante la resistencia a compresión del concreto (f'_c), pero causaron un concreto menos denso que dio lugar a un decremento del orden de 10% en el módulo de elasticidad y en la rigidez lateral. Se requiere de más estudios experimentales para cuantificar este decremento.
- La resistencia a la primera grieta de tensión por flexión y la resistencia aportada por el concreto a la primera grieta diagonal, no fueron afectados por la presencia de fibra en el concreto. Esto se debe a que el refuerzo respectivo (barras o fibra) se activa significativamente después que se producen las fisuras mencionadas. En el muro con refuerzo convencional, la resistencia a cortante fue incrementándose paulatinamente conforme aumentó el grosor de las grietas diagonales, notándose que las barras horizontales proporcionaban resistencia a fuerza cortante después de ocurrir el primer agrietamiento diagonal, llegando a trabajar incluso en su zona de endurecimiento.
- En los muros reforzados con fibra en su región central, el incremento de resistencia a corte fue mínimo después del agrietamiento diagonal, con una ventaja aproximada del 20% de la fibra de acero sobre la de polipropileno. Sin embargo, la fibra evitó la falla frágil y proporcionó ductilidad hasta alcanzarse la distorsión máxima reglamentaria, donde poco después sobrevino una degradación importante de resistencia.

- Se pudieron calcular las cargas asociadas a la primera grieta por flexión, agrietamiento diagonal por cortante y falla por cortante. No hubo deslizamiento en la base de los muros.
- La solución propuesta de usar fibra en reemplazo del refuerzo central convencional, podría aplicarse en edificaciones reales que demuestren tener en sus muros una fuerza cortante última igual o menor que la resistencia a corte aportada por el concreto. El diseño por corte se haría sin contemplar el aporte de resistencia que levemente proporciona la fibra.

Carrillo *et al.* (2016) realizaron un programa experimental donde ensayaron en mesa vibradora (dinámicamente), seis muros aislados de CR y de CRFA diseñados para representar el comportamiento de los muros de primer nivel de una vivienda de uso residencial. Los muros de la vivienda prototipo fueron cuadrados de 2.4 m con un espesor de 10 cm, con un factor de escala geométrico de 1.25. Las variables de este ensaye fueron la dosificación de las fibras (la cual varió de 45 a 75 kg/m³) y la relación de aspecto de la fibra (64 y 80) en cada muro. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- El nivel de agrietamiento diagonal fue esencialmente bajo, ya que el agrietamiento se concentró en dos o tres grietas principales inclinadas en el alma del muro. Sin embargo, se observó mejor distribución de agrietamiento (más grietas de menor espesor) a medida que se incrementó la cantidad de fibras de acero en el concreto. Se observó mejor distribución del agrietamiento en muros con fibras de mayor relación de aspecto. En comparación con los muros de CR, el nivel de agrietamiento de muros de CRFA fue menor.
- A medida que se incrementó la demanda sísmica, se observó que el ancho de las grietas principales incrementa y es en estas donde se concentró el daño y se generó la falla.
- En todos los casos estudiados, se observó falla relativamente súbita sobre las grietas principales por cortante asociada a tensión diagonal, es decir, los muros quedaron divididos completamente en dos o cuatro partes. Sin embargo, se observó que la utilización de elementos de borde proporciona confinamiento y evita la desintegración del muro, aun cuando las grietas principales pueden penetrar a estos elementos en las esquinas y generar un efecto de columna corta en la parte superior de los muros.
- El modo de falla estuvo controlado por el desprendimiento casi simultáneo de las fibras de acero sobre las grietas principales, sin embargo, en ningún muro se observó la fractura de las fibras.
- Los lazos histeréticos de los muros fueron simétricos y estables y no se presentó su estrangulamiento que caracteriza a los muros de CR convencional en fallas por cortante. Por lo tanto, el aumento a tensión del concreto que le proporcionan las fibras al concreto puede ser favorable en la capacidad de disipación de energía de muros de CRFA.
- La resistencia y distorsión asociadas a la pérdida de resistencia lateral están relacionadas comúnmente a una disminución de resistencia del 20%; sin embargo, en los muros estudiados, el estado límite de pérdida de resistencia lateral estuvo asociado a una disminución de resistencia menor que el 20%. Por lo tanto, el estado límite de pérdida de resistencia lateral estuvo asociado al máximo desplazamiento registrado.

- La máxima demanda de distorsión varió entre 0.5% y 1.08% para los distintos muros ensayados.

Con respecto a muros de CR, Carrillo *et al.* (2012-1) compararon las capacidades de desplazamiento y fuerza cortante, así como las características dinámicas de seis muros de CR probados bajo excitaciones de mesa vibradora. Las variables estudiadas fueron la geometría del muro (muros sólidos y muros con aberturas), tipo de concreto (peso normal y peso ligero), relación de refuerzo de acero (0.125% y 0.25%) y tipo de refuerzo (barras corrugadas y malla de alambre soldado). El objetivo fue comprender mejor el comportamiento sísmico de los muros de CR, generalmente utilizados en viviendas de uno o dos pisos en varios países de América Latina. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La contracción temprana de los muros provocó que el valor medio de las frecuencias medidas fuera un 25% más bajo que el valor de diseño.
- La frecuencia de vibración al pico de resistencia al cortante de las muestras fue equivalente al 55%, en promedio, de la frecuencia de vibración inicial.
- Se corroboró que el factor de amortiguamiento del 5% comúnmente utilizado para el diseño basado en código era consistente con los valores medidos en el programa de prueba.
- La respuesta medida reveló que el desempeño de los muros con concreto de peso normal y ligero era comparable.
- El tipo de refuerzo (mallas de alambre soldado y barras corrugadas) afectó significativamente la capacidad de desplazamiento de las muestras.
- El modo de falla de los muros con refuerzo de cortante de malla de alambre soldado fue frágil debido a la limitada capacidad de alargamiento de la propia malla de alambre. Luego, para propósitos de diseño de muros con este tipo de refuerzo de cortante, la capacidad de distorsión máxima se debe considerar igual a la capacidad de distorsión en la resistencia al cortante máximo. Se recomienda que dichos muros se diseñen de modo que las tensiones en la malla de alambre soldado se encuentren dentro del intervalo de comportamiento elástico.
- Debido a las resistencias de diseño del concreto (entre 150 y 200 kg/cm²) y el comportamiento plástico del refuerzo, los muros pueden reforzarse con un 50% de la relación mínima de refuerzo de acero de muro prescrita por el código. Cuando se usan mallas de alambre soldado, la capacidad de resistencia al cortante fue comparable a la de los muros reforzadas con el 100% de la cantidad mínima. Por lo tanto, los muros con un 50% de la relación de refuerzo mínima y las mallas de alambre soldado pueden estar en una casa o vivienda de concreto ubicada en zonas sísmicas de bajo riesgo. Para este caso, las proporciones de distorsión permisible prescritas deberían ser menores al 0.4%.

Arteta *et al.* (2017) analizaron una base de datos de edificios de muros delgados de CR representativo de prototipos de edificios en algunos países de América del Sur. Analizan en detalle variables de interés tales como índice de área de muro, período fundamental de vibración, geometría de muros en sección T, relación de aspecto de muro, detalles de acero de refuerzo,

relación de carga axial, año de construcción, profundidad de eje neutro, relación de cortante distorsión. Introdujeron un factor de acoplamiento de distorsión para evaluar el impacto del acoplamiento del sistema circundante en los muros individuales. Seleccionaron un muro de prototipo representativo de los edificios en la base de datos por medio de un análisis estadístico multivariable. Este prototipo sirvió como sujeto de pruebas de laboratorio. Realizaron experimentos de carga cíclica invertida en un muro delgado de CR rectangular y en forma de T con una relación de aspecto de 3.0 y 3.7, respectivamente. Los especímenes son representativos de la práctica de construcción en áreas de riesgo sísmico intermedio en Colombia. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- El muro en forma de T fue probado para evaluar el comportamiento de los muros más largos dentro de un edificio que controla el comportamiento sísmico. Se observó un desplazamiento significativo fuera del plano para este muro y se produjo la falla para una distorsión lateral del 0.7% mientras se le aplicaba fuerza de compresión. Ambas pruebas indican que, bajo ciertas condiciones, la inestabilidad fuera del plano parece inducir una reducción significativa de la capacidad de deformación de los muros.
- Los desplazamientos promedio obtenidos de los instrumentos colocados a lo largo de la sección de falla para el alma del muro en T muestran esfuerzos de compresión significativas cercanas a 0.008 y esfuerzos de tensión cercanas a 0.038. Estos valores podrían usarse para calibrar el modelo numérico y definir límites de desempeño para este tipo de muros. Sin embargo, existe la necesidad de obtener datos experimentales adicionales teniendo en cuenta las diferentes condiciones de refuerzo, geometría y carga para tener un mejor nivel de confianza en el comportamiento de los muros delgados.

Losas de CRFA

No se ha encontrado evidencia sobre pruebas experimentales sobre losas de CRFA para entrepiso de edificios. Sin embargo, Naaman *et al.* (2007) investigaron la respuesta de paneles de losas HPFRCC a la carga de cortante por penetración. Las losas fueron cuadradas, de 18 cm de espesor, simplemente apoyadas en su periferia y cargadas concéntricamente. El refuerzo convencional con barras consistió de: 1) dos capas de barras de refuerzo (2T-2L) tanto en la parte superior como inferior, 2) sólo dos capas de barras de refuerzo (1T-1L) en la parte inferior de la losa; 3) una capa inferior de barras de refuerzo en la dirección longitudinal de la losa (0T-1L); y 4) sin barras de refuerzo (0T-0L). Las cuatro capas simulaban una cubierta de puente típica de CR diseñada de acuerdo con las especificaciones AASHTO LRFD. Además, evaluó el efecto sobre el comportamiento de cortante por penetración de tres fibras diferentes; alcohol polivinílico (PVA), polietileno de peso molecular ultra alto identificado como SPE, y acero trenzado identificado como Torex. Sus resultados fueron los siguientes:

- La resistencia al cortante por penetración de las losas aumentó entre 15% y aproximadamente 100% cuando se añadieron fibras en cantidades suficientes para lograr un aumento de resistencia a tensión del material compuesto. El mayor aumento se logró con la adición de fibras de acero Torex.

- La capacidad de absorción de energía de las losas de CR medidas hasta una desviación del centro de 45 mm (aproximadamente la longitud del tramo/18) aumentó entre 90% y 280% cuando se agregaron las fibras. Nuevamente el uso de fibras de acero Torex condujo a la mejoría más alta.
- La eliminación de las capas superiores de las barras de refuerzo de las losas de CR y la sustitución del CS por un HPFRCC, con fibras SPE o Torex, no tuvo ningún efecto perjudicial sobre el comportamiento del cortante por penetración. Esto también fue cierto para el caso donde se usaron fibras de Torex y se eliminaron las cuatro capas de barras de refuerzo. De hecho, la losa sin barras de refuerzo y con solo fibras Torex tenía un comportamiento superior a la losa de CR con cuatro capas de barras de refuerzo y sin fibras.
- A diferencia de las losas de CR, el uso de fibras no provocó desconchamiento del concreto en grandes deformaciones.
- Los resultados experimentales sugieren que la resistencia a cortante por penetración de las losas con HPFRCC con geometría similar, ya sea que se usen solos o en combinación con barras de refuerzo, se puede tomar con seguridad como el doble del recomendado para el diseño en el código ACI, es decir, $2/3 \sqrt{f'_c}$ MPa.
- Entre las fibras probadas para el comportamiento del cortante de penetración, las fibras de acero trenzado Torex demostraron ser las mejores, seguidas de las fibras SPE y PVA. Sólo las muestras con fibras de PVA experimentaron una falla extensa al final de la prueba, y la muestra sin barras de refuerzo se rompió en varias partes.

Además, los trabajos de Fernández (1999), Bach *et al.* (2007), Helmink *et al.* (2010), Alvarado (2016), entre otros, sugieren el uso de CRFA en distintos sistemas, como pueden ser:

- Pavimentos de carreteras y aeropuertos.
- Revestimientos de túneles.
- Pisos industriales.
- Capas de compresión.
- Firmes y losas para infraestructura minera.
- Losas de cimentación y/o sobre pilotes.

Uniones muro – losa de CRFA

Aunque no se ha encontrado evidencia sobre pruebas experimentales sobre uniones muro – losa de CRFA como tal, Abdul *et al.* (2012) estudiaron el comportamiento de una junta muro – losa a escala real en un sistema de forma de túnel sometido a carga cíclica lateral. El objetivo fue evaluar el sistema modular conocido como Sistema de Construcción Industrializada (IBS), que es un sistema de prefabricado y es muy común para la construcción de casas y condominios (ya sea en regiones sísmicas o no sísmicas) en Malasia. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La capacidad de momento teórico es ligeramente más alta que la capacidad de momento del experimento. Sin embargo, hay una buena relación entre ellos.

- La rigidez de la junta muro – losa comenzó a disminuir de 0.2% a la distorsión hasta 2.1% de distorsión y perdió rigidez después de 2.1% de distorsión.
- La ductilidad teórica fue más alta que la ductilidad experimental. Sin embargo, esta ductilidad de la junta muro – losa todavía estuvo por debajo del requisito de ductilidad sísmica que normalmente está entre 3.0 y 6.0. Por lo tanto, este tipo de estructura necesita aumentar el porcentaje de barras de refuerzo en el concreto y se requiere el detalle adecuado en la junta para resistir cargas sísmicas.
- Se observaron muchas grietas en las proximidades de la unión muro – losa. La mayoría de las grietas se desarrollaron en el muro posterior, el fondo de la losa y la superficie de la junta del muro y la losa.
- Se descubrió que la unión muro – losa estaba gobernada por fallas frágiles.
- La cantidad mínima de acero vertical y horizontal en la junta muro – losa no fue capaz de soportar la carga adicional. Por lo tanto, se observaron astillas y grietas en el recubrimiento de concreto, los refuerzos longitudinales cedieron y se fracturaron repentinamente sin previo aviso.

Gómez *et al.* (2015) implantaron un programa experimental para estudiar la respuesta de muros de mampostería apoyados sobre losas de concreto. Realizaron el ensayo de un prototipo losa – muro sometido a la acción de cargas verticales y horizontales cíclicas. Además, incluyeron el análisis con elemento finito en ANSYS de modelos analíticos losa – muro obtenidos del trabajo de Gómez *et al.* (2013), los cuales varían las longitudes de muro, material de muro (siendo estos de mampostería y concreto reforzado), espesor de losa y cargas bajo las cuales fueron sometidos (siendo estas horizontal y vertical). Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Para la condición de carga vertical, se sometió al prototipo a una carga vertical con semi-ciclos de carga creciente. A una carga de 5.8 t, valor por debajo de la carga de servicio, se observó un deslizamiento de la losa hacia abajo debido a un primer agrietamiento del concreto. Después se comportó ésta de nuevo de manera elástica. La curva del modelo ANSYS fue congruente con la experimental y coincidió en que el agrietamiento se presenta para el mismo valor de carga.
- Para el caso de carga vertical, derivado del análisis con ANSYS, para modelos losa – muro con el mismo ancho, la rigidez en la etapa de carga de servicio es la misma, independientemente de que se varíe el espesor de la losa, o si son muros de concreto o de mampostería. Aunque se tendrá desde luego más capacidad última del sistema, pero la que interesa es la carga en condiciones de servicio, por lo que un mayor espesor de losa no soluciona el problema de obtener una mayor rigidez.
- En el proceso de sólo carga horizontal se detectó que la rigidez del sistema completo losa – muro fue la tercera parte respecto a la del muro aislado. Debido al valor de carga horizontal aplicado relativamente bajo, el muro tuvo desplazamientos horizontales principalmente por la flexión de la losa (66 %) y por flexión del muro (33 %). No se midieron deformaciones por cortante, por lo que se concluye que el muro no se deformó por cortante. No se realizaron análisis en ANSYS con esta condición.

- Durante los ciclos de cargas combinadas (vertical y horizontal) se observó que la losa se deformó de tal manera que después de cada ciclo se incrementó la deformación residual a una tasa de 0.5 mm sin regresar a su posición inicial, debido a la intensidad de la carga vertical constante y la horizontal cíclica.
- En el proceso de carga combinada, el muro no tuvo deformaciones por cortante en la primera parte del proceso de carga, y sólo se desplazó por flexión y por la rotación en la base debido a la flexión de la losa. Pero a partir de la segunda etapa de carga comenzó la deformación por cortante comportándose de forma elástica y posteriormente de forma no lineal.
- Cuando se compararon las curvas de capacidad del modelo experimental contra las del modelo numérico de ANSYS se observó una excelente correlación entre las dos condiciones revisadas. La rigidez inicial del muro aislado entre la del conjunto losa – muro fue del orden de 3.5 veces. Sin embargo, en los análisis de elemento finito con muros de concreto este cociente es más crítico pues se encontró de 15, es decir, la rigidez del muro de concreto sobre losa disminuye 15 veces respecto a estar fijo en su base.
- Se proponen dos aportaciones en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. La primera en la sección de “análisis por cargas laterales”, se debe solicitar al diseñador calcular de forma adecuada la rigidez lateral relativa cuando se tengan muros apoyados sobre losas, para lograr una respuesta global del sistema que sea adecuada. Y la segunda, de acuerdo con los resultados de cargas verticales, se debe limitar la carga vertical en cada muro para evitar el agrietamiento de la losa.

Brunesi *et al.* (2017) realizaron una prueba cíclica pseudo-estática en una estructura de muro – losa de CR de una sola planta, representativa de una tipología de construcción que es una forma muy común de vivienda en los Países Bajos. Realizaron la prueba de forma bidireccional y abordaron varias preguntas abiertas sobre el comportamiento/desempeño sísmico en ambas direcciones longitudinal (débil) y transversal (fuerte). Ofrecieron curvas de respuesta histeréticas del espécimen y partes clave del mismo, junto con una discusión sobre la evolución del daño del edificio durante las fases de prueba. Estudiaron los problemas de la degradación de la fuerza y la disipación de energía. También desarrollaron un modelo de elementos finitos (FE) basado en fibra simple pero confiable, para evaluar la respuesta sísmica de estructuras de este tipo, y lo compararon con los datos de prueba obtenidos. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- El desplazamiento fuera de plano y en plano de los muros fue el mecanismo de respuesta dominante en las direcciones longitudinal (débil) y transversal (fuerte), respectivamente.
- En la dirección longitudinal, el mecanismo de respuesta se asoció con el aplastamiento/agrietamiento del concreto en la base de los muros y también con el agrietamiento en las juntas del muro y la losa. Las desviaciones de 0.4 y 0.8% correspondieron a las etapas de la primera fisura y al daño mayor para la muestra, como también se confirmó por el conjunto presentado de relaciones de amortiguamiento viscoso equivalentes. Se observó un ablandamiento relativamente modesto después del pico,

mientras que la degradación de la resistencia en el ciclo fue más significativa que entre el ciclo uno.

- En la dirección transversal, el desplazamiento se activó simultáneamente en los tres muros, que se movieron al mismo tiempo y resistieron la misma cantidad de fuerza lateral. La rotación en la base debido a desplazamiento y la deformación pura de los muros se desacoplaron y se encontró que la contribución de esta última era de poca relevancia. De acuerdo con esto, también se concluyó que el aplastamiento del concreto en las esquinas de los tres muros causó sólo una degradación moderada de la resistencia en el ciclo.
- Para el modelo de FE se utilizaron elementos de fibra basados en desplazamiento inelástico y modelos constitutivos bien conocidos que se calibraron de acuerdo con las pruebas de caracterización del material. También tienen en cuenta la baja resistencia de unión proporcionada por el refuerzo de acero liso, que a su vez producen deslizamiento de barras relativas al concreto circundante y limitan su contribución a la resistencia lateral de la estructura. Se compararon las curvas de respuesta numérica y experimental, demostrando la efectividad de la idealización de la FE propuesta, que luego alimentó el desarrollo de las funciones de fragilidad empleadas en el análisis de riesgo sísmico del espécimen probado.

Con el objetivo de evaluar el método de construcción que se ha aplicado ampliamente en viviendas residenciales de gran altura (edificios de varios pisos) como condominios y departamentos en Malasia (desde 1960), Mohd *et al.* (2017) compararon el comportamiento de una junta interior losa – muro para una estructura de forma de túnel diseñada con base en códigos europeos (EC) y británicos (BS). El experimento incluyó una prueba a escala completa de los sub-conjuntos de juntas de losa – muro bajo carga cíclica lateral reversible. Diseñaron y construyeron dos muestras como un sub-ensamblaje de la junta losa – muro en función de ambos códigos. Probaron cada muestra usando control de desplazamiento lateral (control de distorsión). Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La junta interior losa – muro se sometió a cuatro estados principales durante el experimento, que fueron los estados de agrietamiento, fluencia, rotura y falla. Aproximadamente, la unidad BS tuvo un desplazamiento del 0.25% y alcanzó el estado final con un desplazamiento del 0.75%. Más allá del 0.75% de distorsión, la unión falló y finalmente se fracturó al 1.5%.
- La pérdida significativa de rigidez (resultado de la gran disipación de energía) se identificó en el nivel bajo de distorsión (distorsión del 0.1% al 0.5%) seguido de modo gradual hasta el final del experimento para ambos especímenes.
- El espécimen diseñado usando el Eurocódigo (EC) pudo sobrevivir hasta 3.0% de distorsión, mientras que el espécimen BS fue último en 1.5% de distorsión. Los resultados del análisis indican que la muestra de BS se rige por modos de falla frágiles mientras que la muestra de EC se comportó de manera dúctil. El insuficiente refuerzo provisto en la junta de la losa del muro interior para la unidad BS dio como resultado una baja ductilidad que condujo a modos de falla frágiles de la junta.

- La unidad BS no pudo disipar suficiente energía en comparación con la unidad EC para sostenerse más tiempo bajo deformación inelástica. Por lo tanto, se considera que el código BS8110 (BS) ya no es realista para ser adoptado en el diseño del edificio de forma de túnel basado en la demanda sísmica actual en Malasia. De hecho, los edificios estructurales existentes diseñados con este código son vulnerables a la carga sísmica.

Uniones viga – columna de CRFA

Henagar (1977), propuso que el CRFA puede ser usado en lugar de algunos estribos sin comprometer el comportamiento de la unión y así disminuir el problema de congestionamiento de acero. Ramey (1984) continuó con el trabajo de Henagar (1977) e hizo pruebas de uniones viga – columna estudiando principalmente los efectos de flexión, cortante y anclaje que provee el CRFA como una alternativa para disminuir el refuerzo convencional necesario (estribos). Sus conclusiones son las siguientes:

- Las pruebas a flexión mostraron que la ductilidad de rotación de las uniones de CRFA que contienen significativamente menos estribos podría ser similar a la de las uniones reforzadas convencionalmente.
- Las pruebas de cortante y anclaje mostraron que no es necesario tener el mismo grado de confinamiento en las uniones de CRFA para lograr un comportamiento aceptable ante estos dos efectos.
- Si la unión es de CRFA se puede utilizar la mitad de estribos (o menos) de los que necesitaría una unión reforzada convencionalmente.
- En la mayoría de las pruebas realizadas, las uniones con CRFA, el comportamiento fue superior al de uniones de concreto reforzado de manera convencional (CR).

Hashim (1992) realizó una investigación experimental para evaluar el efecto del concreto reforzado con fibra de acero sobre la resistencia a cortante de juntas verticales entre grandes paneles de concreto armado. Doce especímenes a escala natural de juntas planas, dentadas o ranuradas que contenían cantidades variables de fibras se probaron hasta la falla por cortante puro. También propuso un modelo teórico, que tiene en cuenta el efecto combinado de dovela del refuerzo y la resistencia modificada a cortante del concreto debido a las fibras. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Un considerable incremento en la resistencia última a cortante de las juntas verticales entre grandes paneles de concreto armado es obtenida con una cantidad moderada de fibras. Con un contenido de fibras del 1%, el incremento de resistencia es del 54% para las juntas dentadas, 20% para las juntas planas y 10% para las juntas ranuradas.
- La propuesta de modificación a los métodos de diseño del *American Concrete Institute (ACI)* para tomar en cuenta la contribución de las fibras en la resistencia a cortante es razonable y sustentada por éstos resultados experimentales.

- El modelo teórico propuesto toma en cuenta el contenido de fibras y la relación de aspecto de la fibra en la resistencia a cortante de la unión, así como el efecto de dovola del refuerzo que cruza la unión, dando valores de diseño razonables y seguros.
- Se necesita más investigación para refinar la calibración de las constantes empíricas que se basaron en los datos experimentales disponibles pero limitados.

Filiatrault *et al.* (1995) investigaron el uso de concreto reforzado con fibra de acero para mejorar el comportamiento de las uniones viga – columna durante acciones sísmicas. Ensayaron tres uniones viga – columna interiores a gran escala variando el refuerzo en la unión, y parte de un edificio prototipo diseñado de acuerdo con el Código Nacional de Construcción de Canadá. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- El concreto reforzado con fibra es una alternativa posible al refuerzo de confinamiento convencional para proporcionar la ductilidad adecuada en estructuras esqueléticas de concreto armado.
- Las fibras de acero que se unen a través de las grietas en la matriz de concreto aumentan la resistencia a cortante de la junta y pueden reducir los requisitos para las uniones estrechamente espaciadas.
- Se necesitan directrices de diseño de capacidad para hacer un uso seguro y eficiente de esta tecnología en el diseño resistente a terremotos.

Somma (2008) tomó en cuenta varios estudios experimentales realizados por otros investigadores en juntas viga – columna tanto sin y con refuerzos de fibra y propuso una nueva fórmula que predice la resistencia cortante de las juntas de viga – columna de concreto reforzado con fibra. Comparó los valores obtenidos con esta fórmula con los obtenidos mediante las pruebas experimentales. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La aplicación efectiva de fibras de acero en la mezcla conjunta de concreto da como resultado un comportamiento de la junta significativamente mejorado bajo carga sísmica, particularmente con una mayor resistencia a cortante.
- Un aumento en el porcentaje de fibras conduce a aumento de las resistencias a cortante. Esto permite reducir la cantidad de refuerzo transversal en la región de la junta, lo que limita la congestión del acero en las juntas.
- La expresión propuesta (de la cual se obtuvo una fórmula de diseño) toma en cuenta la contribución de las fibras junto con el refuerzo transversal convencional. Esta expresión se comparó con los resultados de los experimentos en 37 articulaciones CRF sometidas a carga sísmica y con otras expresiones proporcionadas por Códigos y autores, y ésta condujo al coeficiente de variación más bajo, incluso 40% más bajo que las expresiones anteriores.

Mohamed *et al.* (2018) investigaron el efecto del uso de diferentes tipos de fibra en el comportamiento de uniones viga – columna de compuestos a base de cemento (ECC) bajo carga cíclica reversible. Probaron uniones viga – columna de ECC con diferentes tipos de fibra, incluidas fibras de alcohol polivinílico de 8 mm y 12 mm (PVA8 y PVA12), fibras de polipropileno de 13 mm

(PP13) y fibras de acero de 13 mm (SF13). También probaron una unión viga – columna de concreto reforzado convencional (CR) hecha con un agregado grueso de 10 mm para comparación. En las muestras analizadas evaluaron el comportamiento de histéresis, la ductilidad, la capacidad de disipación de energía y el comportamiento de agrietamiento. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- Aunque los ECC mostraron una resistencia a la compresión comparable al CR, el mecanismo de puente de las fibras (efecto de cierre de grietas) aumentó significativamente la resistencia a la tensión de los ECC en comparación con la del CR. La mayor mejora en la resistencia a la tensión se observó cuando se introdujo SF13 en el compuesto a base de cemento.
- Las envolventes de las curvas carga – desplazamiento de las muestras realizadas con ECC indicaron una rigidez inicial más alta y una tasa de degradación de la rigidez más baja en comparación con la muestra de CR en la etapa previa al pico de la gráfica. De manera similar, en la etapa post-pico, los ECC mostraron una pérdida de fuerza y rigidez más suave y gradual, manteniendo así una integridad estructural razonable más allá de la capacidad final.
- Las uniones viga – columna de ECC con fibras poliméricas (PVA y PP) mostraron un comportamiento mejorado con carga cíclica en comparación con la unión de CR. La mejoría más alta de las juntas de ECC con fibras poliméricas se observó en la muestra con PVA8, alcanzando hasta el 32.7%, 22.9%, 55.8% y 56.1%, en carga de primera fisura, carga final, ductilidad y capacidad de disipación de energía, respectivamente, en comparación con la unión de CR.
- En las muestras de ECC con fibras poliméricas, el uso de fibras de PVA más cortas y de mayor resistencia a la tracción (PVA8 vs. PVA12) parece tener una mejor influencia en la mejora del comportamiento de las uniones viga – columna bajo carga cíclica reversible en términos de la carga de primera fisura, la carga final, ductilidad, capacidad de absorción de energía y comportamiento de agrietamiento.
- Las uniones de ECC con fibras poliméricas (PVA y PP) mostraron un mejor comportamiento de agrietamiento en comparación con la junta de CR. Los patrones de falla de las uniones de ECC se caracterizaron por múltiples grietas con anchos más pequeños en comparación con la junta de CR. En el espécimen con fibras de acero, el uso de SF13 restringió efectivamente la formación de grietas, lo que permitió que se desarrollaran menos grietas con anchos más grandes (en comparación con las juntas de ECC con fibras poliméricas).
- A diferencia de la unión viga – columna de CR, no se observaron grietas diagonales significativas en la parte de viga de las uniones de ECC en el momento de la falla. Esto indica una mejor resistencia de las uniones de ECC contra la tensión de corte inducida durante la carga cíclica reversible.
- En comparación con las fibras poliméricas (PVA8, PVA12 y PP13), el uso de SF13 exhibió las mejoras más altas en el comportamiento cíclico en términos de la carga de primera grieta, la carga final, la ductilidad y la capacidad de disipación de energía, alcanzando valores de 82.4%, 26%, 101.3% y 101% más altos que los de la articulación NC.

Estudiando la revisión anterior, es evidente que en varias partes del mundo se han desarrollado bastantes trabajos, experimentos e investigaciones para conocer mejor el comportamiento que adopta el concreto con la adición de fibras en el uso estructural de este material, encontrando resultados interesantes y atractivos desde el punto de vista estructural. Incluso el día de hoy existen muchos investigadores estudiando este efecto en diversos sistemas estructurales (entre los que destacan vigas, muros y uniones viga – columna).

Sin embargo, también existe una falta de información y de conocimiento en cuanto a uniones muro – losa de CRFA se refiere. Esto pese a que las soluciones estructurales a base de muros son un sistema estructural resistente muy usado en zonas sísmicas.

Resulta entonces de gran interés entender el comportamiento de este tipo de uniones ante cargas laterales. El desarrollo del presente trabajo permite, con base en los experimentos realizados, tener un acercamiento al comportamiento del CRFA en uniones muro – losa en términos de capacidad de carga y de deformación. Un buen comportamiento podría causar un gran impacto en la industria de la construcción, pues permitiría aprovechar, de una mejor manera, las ventajas del concreto reforzado con fibras.

3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

Estructura prototipo

Se usó una estructura prototipo de CR propuesta por Guerrero (2017) y diseñada bajo cargas verticales solamente. Las características geométricas se muestran en la Figura 2.

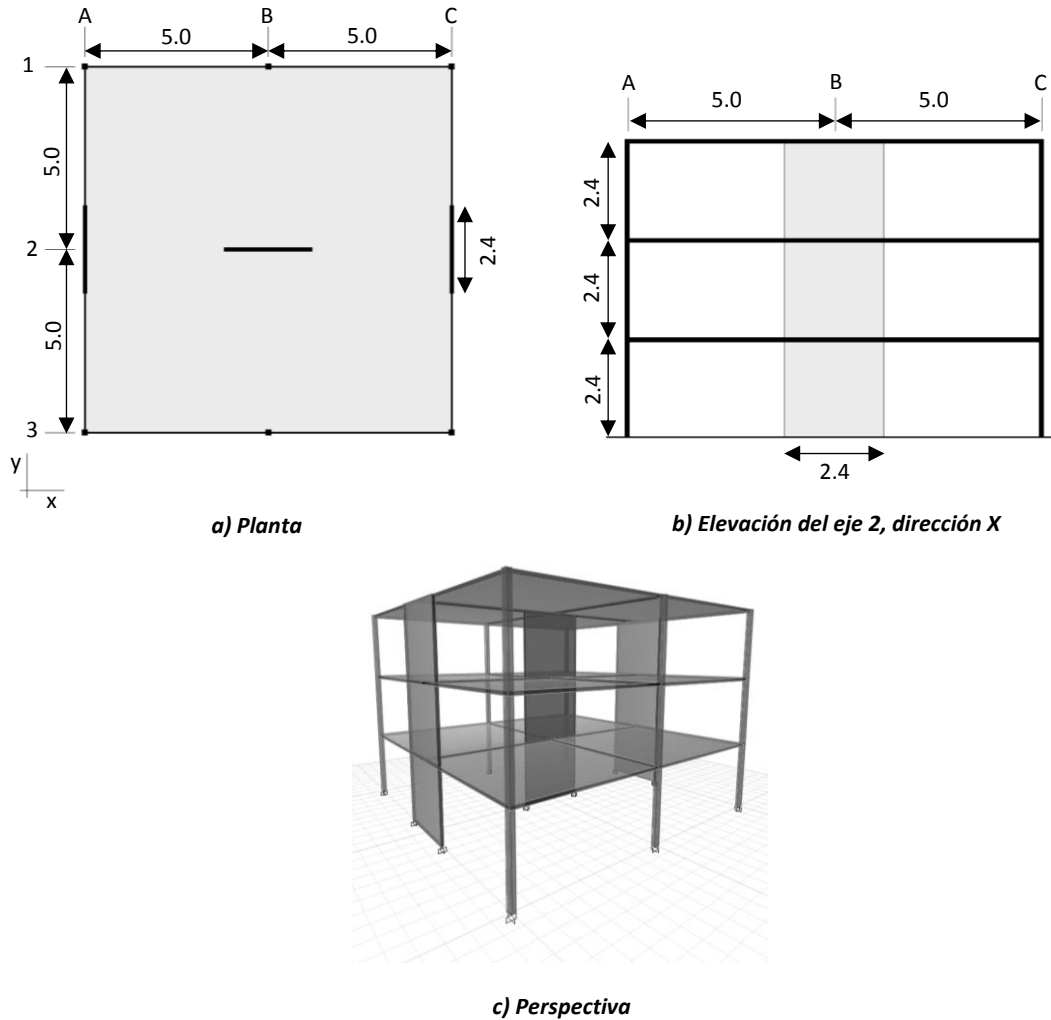


Figura 2. Geometría de la estructura prototipo (dimensiones en m)

Todos los muros tienen una longitud de 2.4 m y su espesor es de 10 cm. La losa también tiene un espesor de 10 cm. Las columnas sobre los ejes 1 y 3 son de sección cuadrada de 15×15 cm. Las propiedades mecánicas de los materiales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales

Material	Resistencia (kg/cm²)
Concreto	$f'_c = 350$
Acero de refuerzo	$f_y = 4,200$

3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

Las cargas vivas verticales aplicadas a la estructura corresponden a las establecidas en las *Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones* (NTC Criterios, 2017) para un edificio destinado a uso habitacional. Las cargas correspondientes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Cargas vivas unitarias en kg/m²

Uso	Media (W)	Instantánea (W _a)	Máxima (W _m)
Habitacional	80	100	190
Azotea con pendiente no mayor a 5%	15	70	100

Además, se consideró la sobrecarga reglamentaria de 40 kg/m² establecida en las NTC Criterios (2017) y una sobrecarga muerta de 260 kg/m² debida a instalaciones, acabados, cancelería, muros no estructurales, etc. Así, la sobrecarga muerta total (SCM) es de 300 kg/m². De igual manera se consideró el peso propio de la estructura (PP) directamente en el modelo numérico.

Para los efectos laterales debidos a sismo, se utilizó el espectro correspondiente de diseño de acuerdo con las recomendaciones del *Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por sismo de la Comisión Federal de Electricidad* (MOC CFE Sismo, 2015). El municipio considerado fue Acapulco de Juárez, en el estado de Guerrero, debido a la alta sismicidad de la zona. Se consideró un factor de comportamiento sísmico de $Q = 2$, un factor de sobre-resistencia de $R = 2.5$, y terreno rocoso. Se consideró la aplicación del sismo (S_x) y (S_y) en las direcciones respectivas X y Y (de acuerdo con la Figura 2a). El espectro de diseño utilizado se muestra en la Figura 3, el cual fue generado por el *Programa de Diseño Sísmico* (PRODISIS), programa propio del MOC CFE Sismo (2015).

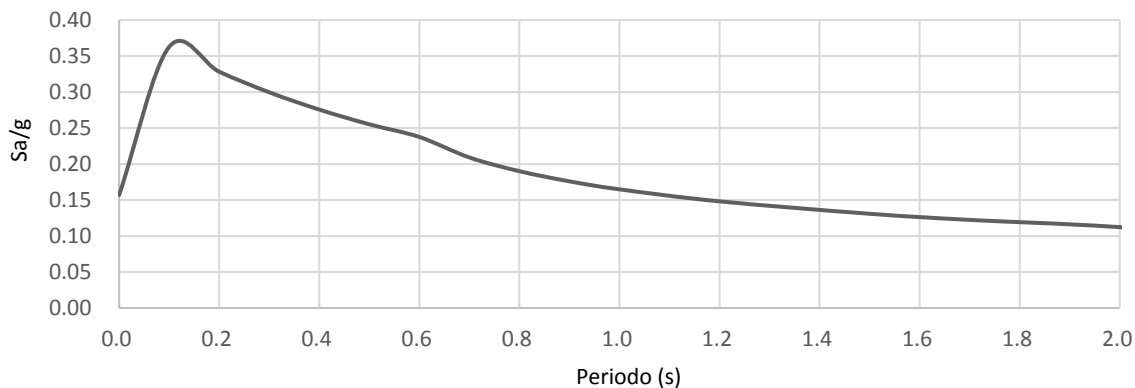


Figura 3. Espectro de diseño – PRODISIS (Acapulco de Juárez, Edo. de Guerrero)

Las combinaciones de diseño usadas para el análisis son las correspondientes a las establecidas en las NTC Criterios (2017). Dichas combinaciones se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Combinaciones de diseño

Combinación	Cargas involucradas
CSG (Carga de Servicio Gravitacional)	$1.3 \times (PP + SCM) + 1.5 \times W_m$
SXX (Sismo en dirección X)	$1.1 \times (PP + SCM + W_a + S_x + 0.3 \times S_y)$
SYY (Sismo en dirección Y)	$1.1 \times (PP + SCM + W_a + S_y + 0.3 \times S_x)$

Para la obtención de los casos más desfavorables (especialmente de fuerzas actuantes), se consideró una combinación más, la cual es una envolvente de los resultados de las combinaciones mostradas en la Tabla 3.

Se realizó el análisis de la estructura prototipo en el programa *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems* (ETABS, 2016). Para fines del presente trabajo, la dirección de interés de la estructura prototipo es la elevación del eje 2, mostrada en la Figura 2b. Así mismo, las fuerzas actuantes de interés son las correspondientes a la combinación SXX, específicamente las que son aplicadas sobre el muro central. Los resultados de interés del análisis realizado se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados del análisis de la estructura prototipo

<i>Carga axial en muro (t)</i>	<i>Cortante en muro (t)</i>	<i>Momento en muro (t-m)</i>	<i>Periodo fundamental (s)</i>
143.0	50.0	275.0	0.35

Características de los especímenes

La geometría de los especímenes ensayados surgió de un sub-ensamblaje de la estructura prototipo, específicamente de la unión muro – losa del eje B y 3 en el primer nivel (Figura 4).

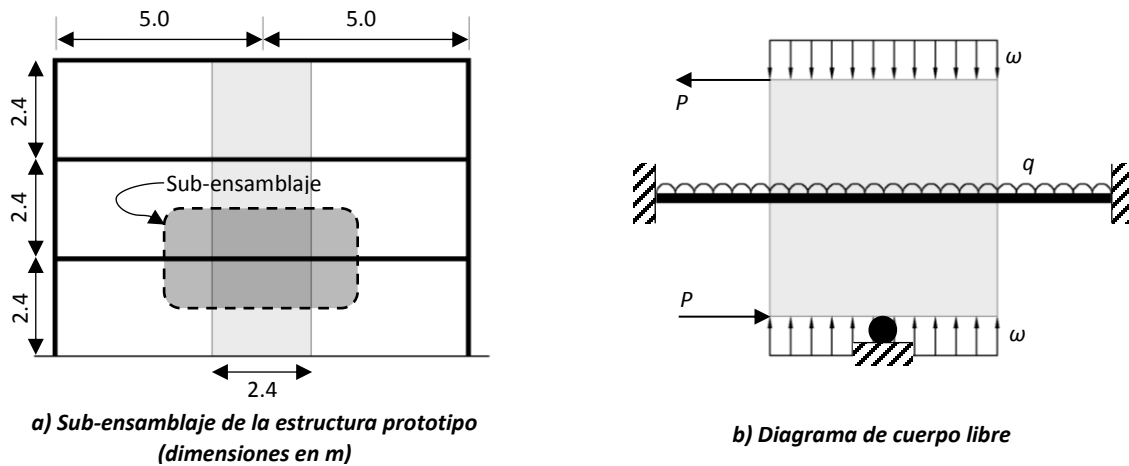
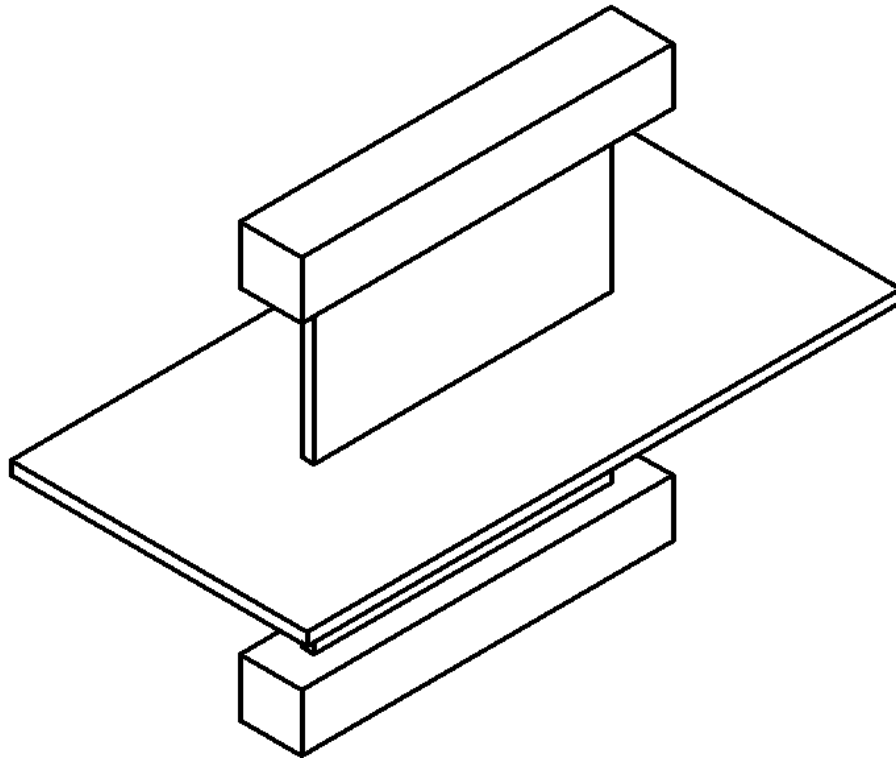


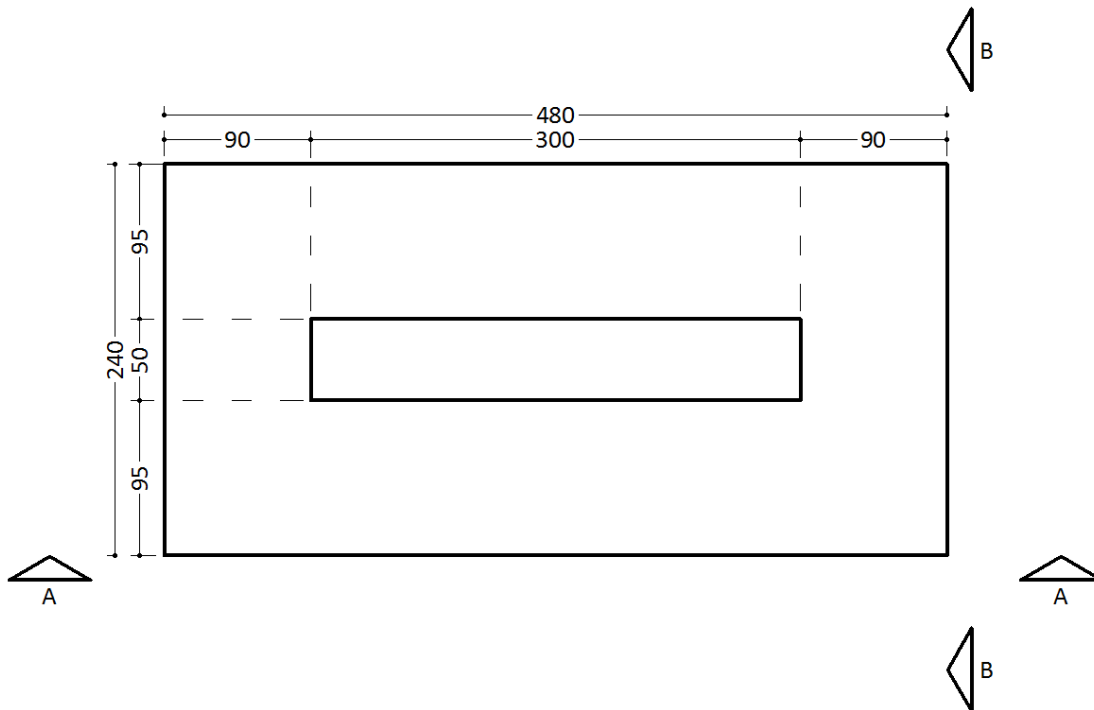
Figura 4. Sub-ensamblaje de unión muro – losa

Geometría

Para poder simular el modelo matemático de la Figura 4b, se utilizó la geometría descrita en la Figura 5 para los especímenes a ensayar. Todos los especímenes fueron construidos a escala 1:1 (escala natural). Cabe mencionar que estas medidas fueron dispuestas así principalmente por necesidades del modo de ensayo, por procedimiento constructivo y por capacidades del laboratorio del CENAPRED.



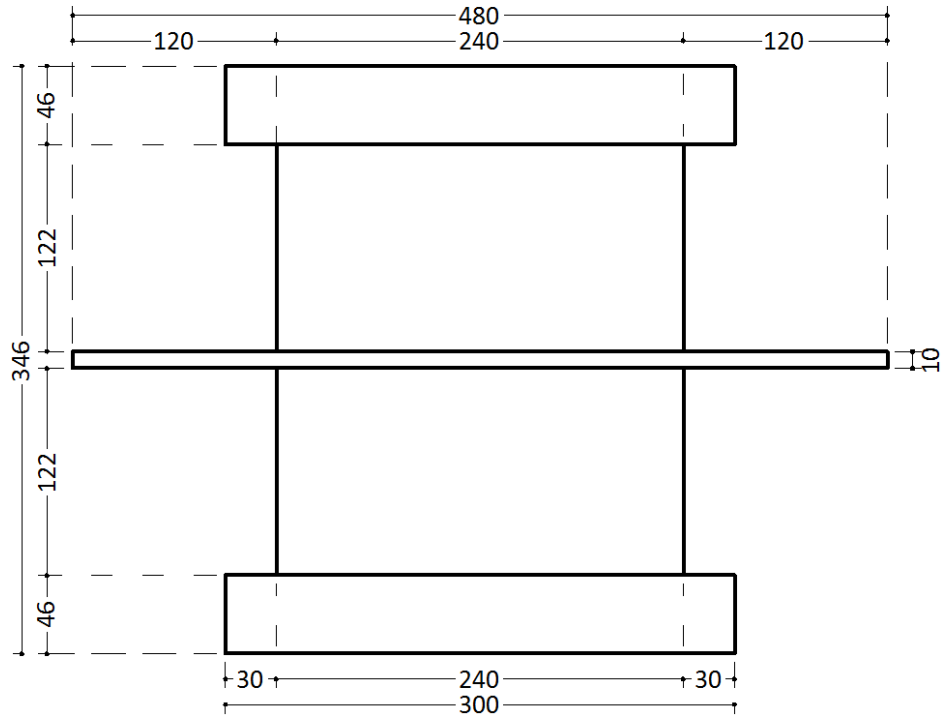
a) Isométrico



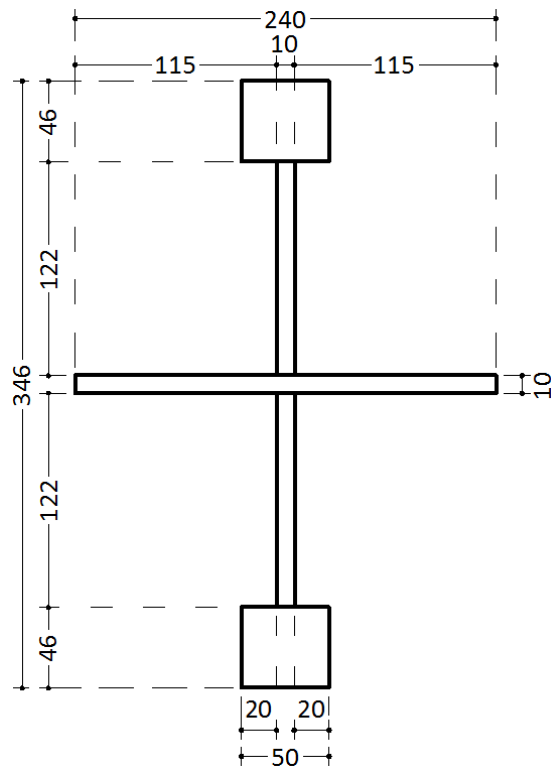
b) Vista superior

Figura 5. Geometría de los especímenes a ensayar (dimensiones en cm)

3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO



c) Vista frontal A-A



d) Vista lateral B-B

Figura 5 (continuación). Geometría de los especímenes a ensayar (dimensiones en cm)

Materiales utilizados

- Concreto: Concreto premezclado en planta CEMEX (*Cementos Mexicanos S.A.*), clase 1 Estructural, $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, agregado grueso (caliza) con tamaño máximo de 10 mm, revenimiento 10-18 cm, edad de especificación de 28 días, cemento CPC 40 (CEMEX, 2018).
- Fibras: Fibra Dramix 5D 65/60BG, trefilada al frío, de acero brillante, con anclajes en los extremos (ganchos), encolada en fajos (Bekaert, 2017).
- Barras de refuerzo: Barras corrugadas de acero, $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$.
- Barras de presfuerzo: Barras redondas lisas de acero, $f_y = 3,520 \text{ kg/cm}^2$.

Refuerzo

El armado con barras corrugadas del muro se diseñó bajo la aplicación de la fuerza cortante obtenida del análisis de la estructura prototipo (Tabla 4) directamente sobre la parte central de los cabezales inferior y superior del espécimen. Bajo esta condición, el cortante y momento actuantes sobre el muro y la losa del espécimen son los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Elementos mecánicos actuantes sobre el muro y la losa del espécimen

<i>Elemento</i>	<i>Cortante (t)</i>	<i>Momento (t-m)</i>
Muro	50.0	72.5
Losa	40.5	26.9

El diseño a cortante del muro del espécimen se realizó con base en lo establecido en las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto* (NTC Concreto, 2017). El cortante resistente es:

$$V_R = V_{cR} + V_{sR}$$

Donde:

- V_{cR} Cortante que resiste el concreto
- V_{sR} Cortante que resiste el acero de refuerzo.

El cortante que resiste el concreto está dado por:

$$V_{cR} = 0.85F_R\sqrt{f'_c}tL$$

Donde:

- F_R Factor de resistencia. Para cortante $F_R = 0.75$
- f'_c Resistencia especificada del concreto a compresión
- t Espesor del muro
- L Longitud total del muro.

Así:

$$V_{CR} = 0.85 \times 0.75 \times \sqrt{350} \times 10 \times 240 = 28,624 \text{ kg}$$

El cortante que resiste el acero puede expresarse como:

$$V_{SR} = F_R p_m f_y A_{cm}$$

Donde:

p_m	Cuantía de acero a cortante
f_y	Esfuerzo de fluencia del acero
A_{cm}	Área bruta de la sección de cortante.

Por definición, la cuantía de acero está dada por:

$$p_m = \frac{A_{vm}}{s_m t}$$

Donde:

A_{vm}	Área de acero paralela a la fuerza cortante comprendida en una distancia s_m
s_m	Separación del refuerzo perpendicular a la fuerza cortante.

Se usó como refuerzo una parrilla de barras corrugadas de acero del #3@20 cm al centro del muro:

$$p_m = \frac{0.71}{20 \times 10} = 0.00355$$

Por lo tanto:

$$V_{SR} = 0.75 \times 0.00355 \times 4,200 \times 240 \times 10 = 26,838 \text{ kg}$$

$$V_R = 28,624 + 26,838 = 55,462 \text{ kg} = 55.46 \text{ t}$$

Para el diseño a flexocompresión del muro del espécimen se realizó un análisis de compatibilidad de deformaciones (permitido en las NTC Concreto, 2017), con base en el armado obtenido del diseño por cortante del muro del espécimen. En este procedimiento, la resistencia a flexión está dada por:

$$M_R = \sum_{i=1}^{\text{\#barras en tension}} P_i d_i$$

Siempre que se cumpla que:

$$C_C = T$$

Donde:

$$C_c = \beta_1 c f''_c t$$

$$T = \sum_{i=1}^{\text{\#barras en tension}} P_i$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f'_c}{1,400} \geq 0.65$$

$$P_i = \begin{cases} a_b \times E_s \times \varepsilon_{s_i} & \text{si } \varepsilon_{s_i} < \varepsilon_y \\ a_b \times f_y & \text{si } \varepsilon_{s_i} \geq \varepsilon_y \end{cases}$$

En la Figura 6 se ilustra gráficamente el procedimiento anterior.

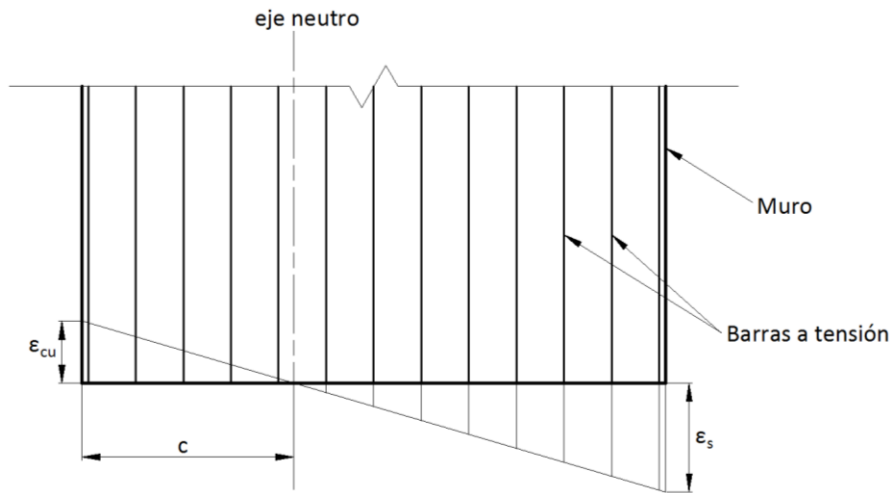


Figura 6. Compatibilidad de deformaciones

En las expresiones anteriores y en la Figura 6:

- c Profundidad del eje neutro (propuesto)
- f''_c Magnitud del bloque equivalente de esfuerzos del concreto a compresión = $0.85f'_c$
- t Espesor del muro
- a_b Área de la barra i en tensión
- E_s Módulo de elasticidad del acero = $2,100,000 \text{ kg/cm}^2$
- ε_y Deformación última del acero = f_y/E_s
- ε_{cu} Deformación última del concreto = 0.003
- d_i Distancia de la barra i en tensión hacia el eje neutro

Los valores de ε_{s_i} se obtienen mediante triángulos semejantes con los valores de c y ε_{cu} . Se realizaron iteraciones y se encontró que, para las características del muro del espécimen, la igualdad $C_c = T$ se cumple para $c = 14.74 \text{ cm}$. Con este valor, el momento resistente del muro es:

$$M_R = 41.25 \text{ t} \cdot \text{m}$$

Las resistencias del muro del espécimen se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resistencia del muro del espécimen

<i>Resistencia a cortante (t)</i>	<i>Resistencia a flexocompresión (t-m)</i>
55.46	41.25

Por facilidad constructiva, se colocó el mismo armado del muro en la losa (parrilla central de barras corrugadas del #3@20 cm). Los elementos resistentes (cortante y flexión) de la losa se calcularon bajo lo establecido en las NTC Concreto (2017). Para la resistencia a cortante de la losa se tiene:

$$V_R = 0.5F_R b d \sqrt{f'_c}$$

Donde:

- F_R Factor de resistencia. Para cortante $F_R = 0.75$
- f'_c Resistencia especificada del concreto a compresión
- b Ancho total de la losa
- d Peralte efectivo de la losa.

$$V_R = 0.5 \times 0.75 \times 240 \times 5 \times \sqrt{350} = 8,419 \text{ kg} = 8.42 \text{ t}$$

Para la resistencia a flexión de la losa se tiene que:

$$M_R = F_R A_s f_y d (1 - 0.5q)$$

$$q = \frac{p f_y}{f''_c}$$

$$p = \frac{A_s}{b d}$$

Donde:

- F_R Factor de resistencia. Para flexión $F_R = 0.90$
- A_s Área de acero de tensión
- f_y Esfuerzo especificado de fluencia del acero
- d Peralte efectivo
- b Ancho total de la losa
- p Cuantía de refuerzo en tensión
- f''_c Magnitud del bloque equivalente de esfuerzos del concreto a compresión = $0.85 f'_c$.

De esta manera:

$$A_s = 13 \times 0.71 = 9.23 \text{ cm}^2$$

$$p = \frac{9.23}{240 \times 5} = 0.00769$$

$$q = \frac{0.00769 \times 4,200}{0.85 \times 350} = 0.1085$$

$$M_R = 0.9 \times 9.23 \times 4,200 \times 5 \times (1 - 0.5 \times 0.1085) = 164,976 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 1.65 \text{ t} \cdot \text{m}$$

Las resistencias de la losa del espécimen se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resistencia de la losa del espécimen

<i>Resistencia a cortante (t)</i>	<i>Resistencia a flexión (t-m)</i>
8.42	1.65

Para el refuerzo mediante fibras en los especímenes, se utilizaron las fibras Dramix 5D 65/60BG de la empresa Bekaert (fibra trefilada al frío, de acero brillante con anclajes en los extremos, encolada en fajos de fibras), ya que es una de las más comercializadas a nivel mundial para refuerzo en el concreto (Bekaert, 2012). Bekaert (2017) indica una dosificación mínima de 15 kg/m³ para este tipo de fibras y reporta las propiedades de las mismas (Tabla 8), así como los resultados de las pruebas en vigas para la resistencia residual a flexión con las características mostradas en la Figura 7.

Tabla 8. Propiedades de la fibra

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Longitud (mm)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Aspecto</i>	<i>Resistencia a tensión (kg/cm²)</i>	<i>Elasticidad (kg/cm²)</i>
5D 65/60BG	60	0.9	65	23,445	2,140,673

Previamente y con base en las recomendaciones de la NMX C 535, se ensayaron vigas de CRFA usando fibras Dramix 5D con distintas dosificaciones y se compararon sus resultados con los reportados por la misma empresa Bekaert (Bekaert, 2017). Aunque el método de ensayo no es exactamente el mismo al descrito en la EN 14651 usado por Bekaert (2017), los resultados obtenidos sirvieron para proponer una dosificación para los primeros 3 especímenes aquí tratados. Para fines de comparación, los resultados mostrados en la Figura 7 se presentan en términos de esfuerzo (kg/cm²) y ductilidad de desplazamiento (δ/δ_v).

En la Figura 7 se observa que los esfuerzos a flexión obtenidos por Bekaert (2017) son superiores a los obtenidos para la viga con la misma dosificación de fibras. Esto se debe en parte a que la resistencia del concreto utilizado por Bekaert (2017) es superior (300 kg/cm² contra 250 kg/cm² que se usaron en las pruebas). Otra razón puede ser la técnica de mezclado de concreto para las vigas ensayadas, ya que fueron construidas por estudiantes de servicio social con poca (o nula) experiencia en fabricación de concreto.

Por otra parte, el ACI 318 (2014) establece una dosificación mínima de 60 kg/m³ cuando se busca una alternativa de diseño para el refuerzo cortante para vigas con refuerzo longitudinal a flexión en las cuales el esfuerzo cortante último no excede de $\phi 0.54 \sqrt{f'_c}$, con f'_c en kg/cm² y $\phi = 0.75$.

3 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

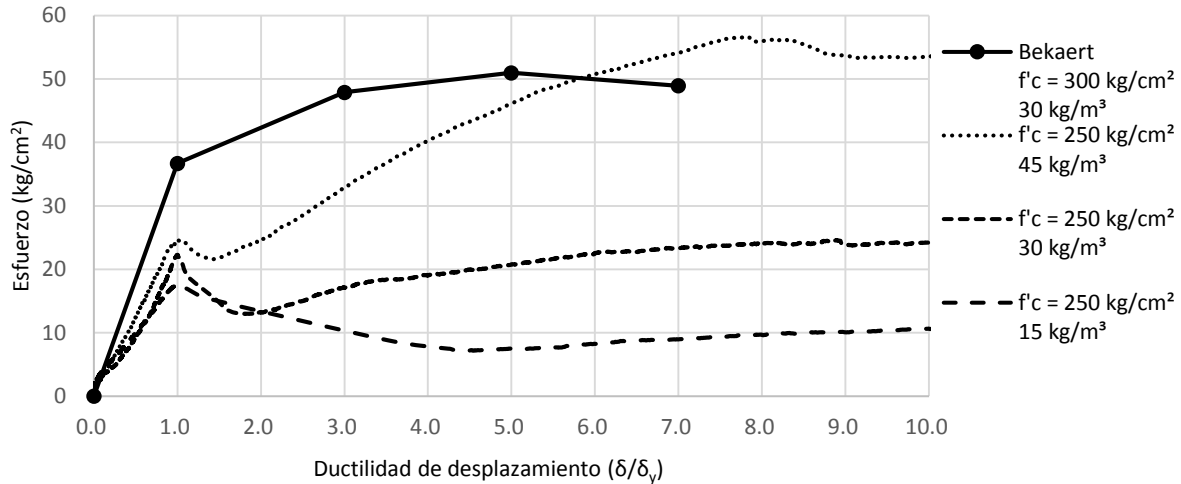


Figura 7. Comparación de resultados

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de las fibras como refuerzo en el concreto se usó, para estas tres primeras pruebas de uniones muro – losa, una dosificación de fibras de 30 kg/m³.

El refuerzo usado en cada espécimen y el refuerzo mínimo que establecen las NTC Concreto (2017) se presentan en la Tabla 9. El detalle de armado de los especímenes completo se puede consultar en el Apéndice A. Detalles de armados.

Tabla 9. Refuerzo de especímenes

Especímen	Nombre	Construcción	Refuerzo en muro (horizontal y vertical)		Refuerzo en losa	
			Barras (cuantía)	Fibras	Barras (cuantía)	Fibras
1	Control	En sitio	#3@20 (0.00355)	-	#3@20 (0.00769)	-
2	Híbrido	En sitio	#3@40 (0.00178)*	30 kg/m ³	#3@40 (0.00414)	30 kg/m ³
3	Fibras 1	En sitio	-	30 kg/m ³	-	30 kg/m ³

Cuantía mínima en muro (NTC Concreto, 2017): 0.00283

Cuantía mínima en losa (NTC Concreto, 2017): 0.00311

***No cumple con la cuantía mínima establecida en NTC Concreto (2017)**

Carga axial en muros

Para simular la carga axial sobre el muro, en cada espécimen se colocaron seis barras redondas lisas de acero de 5/8" de diámetro en la altura y a lo largo de todo el muro y cada una se presforzó a un 60% de su esfuerzo de fluencia, siendo este de $f_y = 3,520 \text{ kg/cm}^2$. La fuerza total aplicada por las barras fue de 25 t, que corresponde aproximadamente al 3% de la capacidad a carga axial del muro ($f'_c A_{muro}$). La ubicación exacta de cada barra se puede consultar en el Apéndice A. Detalles de armados.

Cargas sobre la losa

Se usaron barras de plomo para aplicar carga vertical sobre la losa. Ésta carga representa, más que el valor de la carga establecida en la estructura prototipo (carga viva y/o sobrecarga muerta), la

fuerza cortante necesaria para hacer fallar la losa del espécimen por cortante más que por flexión. Esto se dispuso así para inducir la falla justo en la unión muro – losa de los especímenes. Para considerar este efecto, se aplicó el procedimiento descrito por Priestley *et al.* (2007), el cual básicamente afecta la resistencia a fuerza cortante de un elemento de CR con base en la ductilidad de curvatura del mismo. Así, para el caso de la losa del espécimen *Control*, la resistencia a cortante está dada por:

$$V_c = \alpha\beta\gamma\sqrt{f'_{ce}} (0.8A_g)$$

donde:

$$1.0 \leq \alpha = 3 - \frac{M}{VD} \leq 1.5$$

$$\beta = 0.5 + 20\rho_l \leq 1$$

$$f'_{ce} = 1.3f'_c$$

- M y V Momento y cortante en la sección crítica
- D Profundidad total de la sección
- ρ_l Cuantía de acero longitudinal
- f'_c Resistencia especificada del concreto a compresión en MPa
- A_g Área total de la sección en m²
- γ Componente de ductilidad obtenida de la Figura 8
- f'_{ce} Resistencia a compresión esperada del concreto para el diseño por desplazamiento.

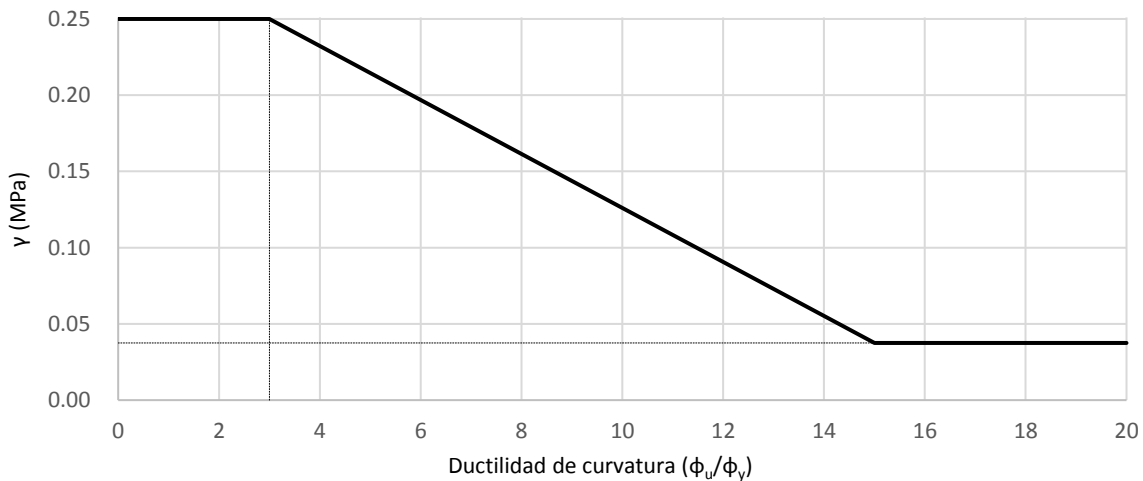


Figura 8. Componente de ductilidad en la resistencia a cortante para diseño de elementos nuevos de concreto bajo flexión uniaxial

Para poder hacer uso del procedimiento anterior, se calculó el diagrama momento – curvatura de la losa del espécimen. De acuerdo con el procedimiento descrito por Park *et al.* (2016) el diagrama

momento – curvatura puede construirse de la siguiente manera, para el momento y curvatura de agrietamiento (cr):

$$M_{cr} = \frac{f_{cr} I}{\bar{y}_{fondo}}$$

$$\phi_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c \bar{y}_{fondo}}$$

donde:

$$f_{cr} = 2\sqrt{f'_c}$$

$$\bar{y}_{fondo} = h - \bar{y}$$

I y \bar{y} Momento de inercia y profundidad del eje neutro respectivamente, de la sección no agrietada transformada

Para el momento y curvatura de fluencia (y):

$$M_y = A_s f_y d \left(1 - \frac{1}{3}k\right)$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d(1-k)}$$

donde:

$$k = \sqrt{(\rho\eta)^2 + 2\rho\eta} - \rho\eta$$

$$\eta = \frac{E_s}{E_c}$$

Y para el momento y curvatura últimos (u):

$$M_u = 0.85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c}$$

donde:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Con base en las características de la losa, los valores correspondientes al procedimiento de Park *et al.* (2016) se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Momentos y curvaturas de condiciones de agrietamiento, fluencia y última de la losa

Condición	M (t-m)	ϕ (rad/cm)
Agrietamiento (cr)	1.50	0.000029
Fluencia (y)	1.76	0.000581
Último (u)	1.84	0.004405

El diagrama momento – curvatura de la losa se muestra en la Figura 9.

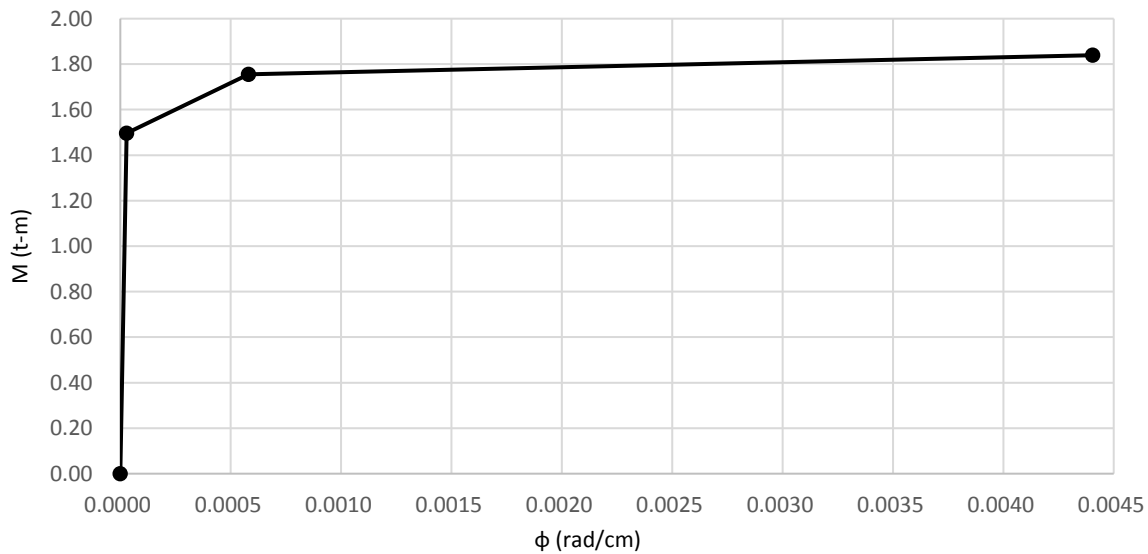


Figura 9. Diagrama Momento – Curvatura de la losa

Con la información de la Tabla 10 se calculó el cortante resistente de la losa según el procedimiento de Priestley *et al.* (2007), se varió la ductilidad de curvatura (con ϕ_u como variable) y se calculó el cortante resistente correspondiente a cada ductilidad de curvatura de la losa. En la Figura 10 se muestra esta variación del cortante resistente y también se muestra el cortante asociado a los momentos graficados en la Figura 9. En la Figura 10 se muestra también el valor del cortante requerido para que la falla de la losa esté regida por el cortante. Claramente se aprecia que la falla está regida por flexión.

Es importante destacar que se colocaron 60 barras de plomo distribuidas en toda la losa del espécimen. Cada barra pesa aproximadamente 48 kg, es decir, se colocaron aproximadamente 2.9 t distribuidas en toda la losa. Sin embargo, en teoría ésta carga no fue suficiente para poder lograr que la losa fallara por cortante, pero debido a la densidad de lingotes colocados (Figura 22), no fue posible colocar más lingotes. Por lo tanto, la falla estuvo dominada por flexión.

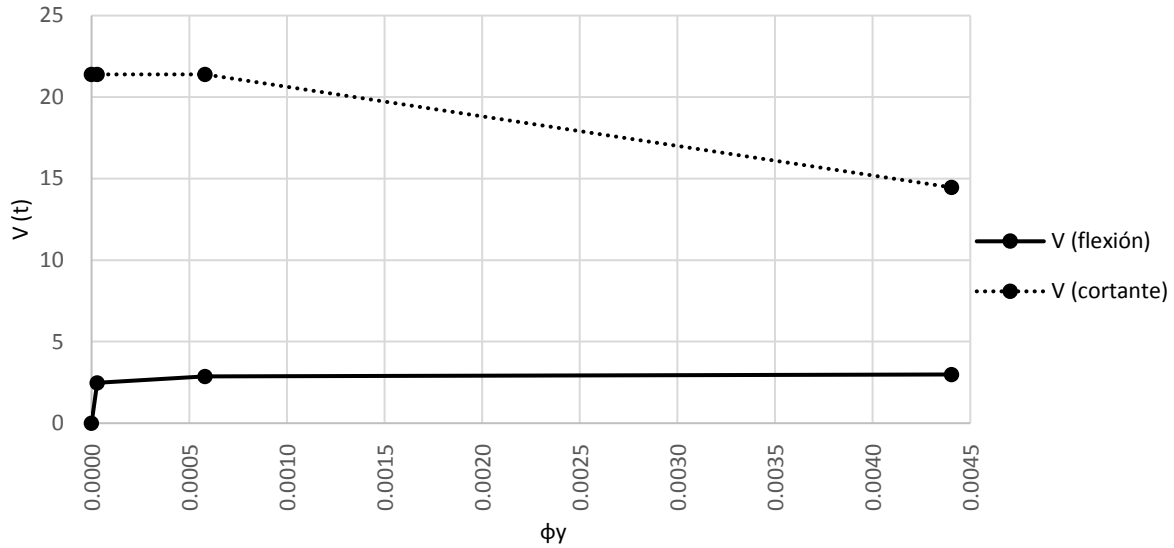
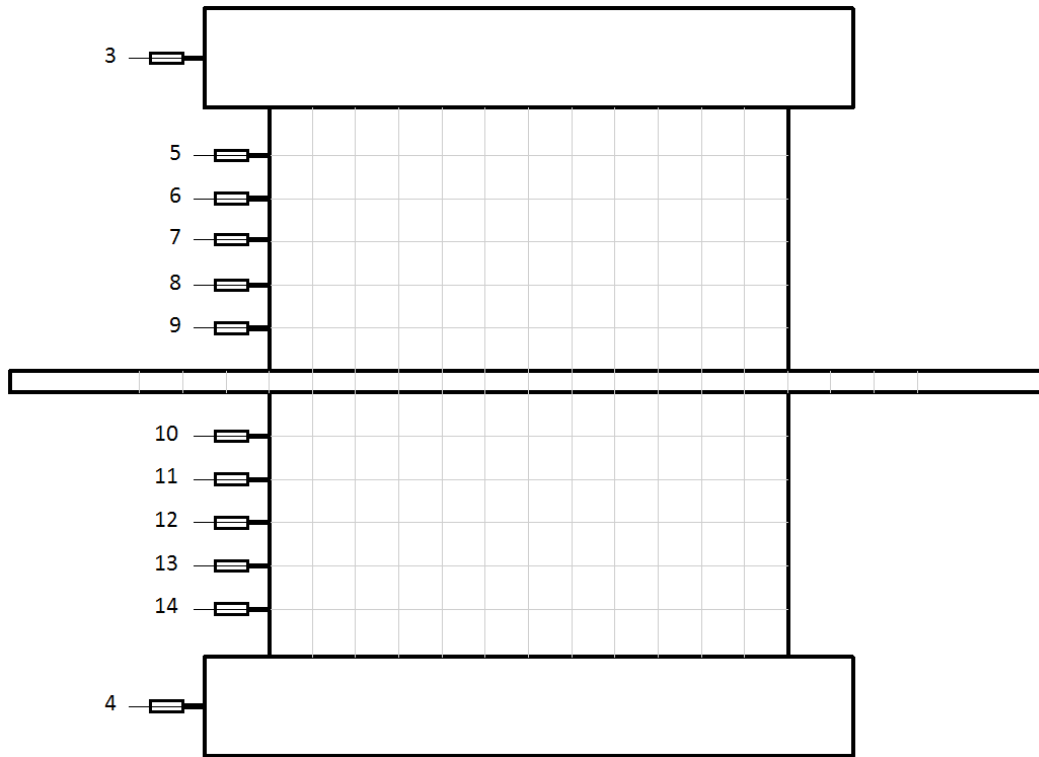


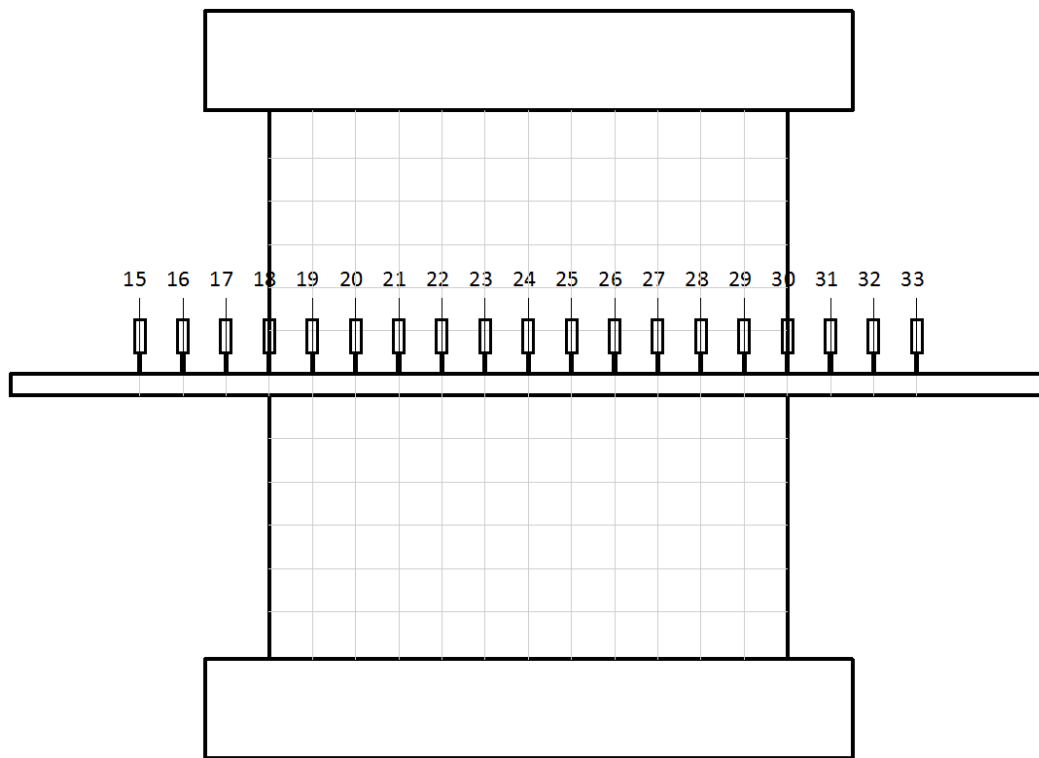
Figura 10. Cortante por flexión y cortante resistente

Instrumentación

En la parte lateral de los muros se colocaron un total de 12 transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT, por sus siglas en inglés *Linear Variable Displacement Transducer*), 10 de ellos directamente sobre el canto de los muros (cinco en el muro superior y cinco en el muro inferior) y dos en los cabezales del espécimen (uno en el cabezal superior y uno en el cabezal inferior). También se colocaron 19 LVDT a lo largo de parte superior de la losa para determinar la configuración deformada de la losa durante los ensayos. Se colocaron ocho micrómetros para medir las deformaciones diagonales sobre el muro superior del espécimen, sólo en la cara posterior del mismo. En la Figura 11 se muestra la posición de la instrumentación. La cuadrícula mostrada en los especímenes es de 20×20 cm partiendo desde la losa. En el Apéndice B. Numeración y características de la instrumentación se puede consultar las características y numeración de todos los instrumentos utilizados. No se usó instrumentación interior (deformímetros) en ningún espécimen.

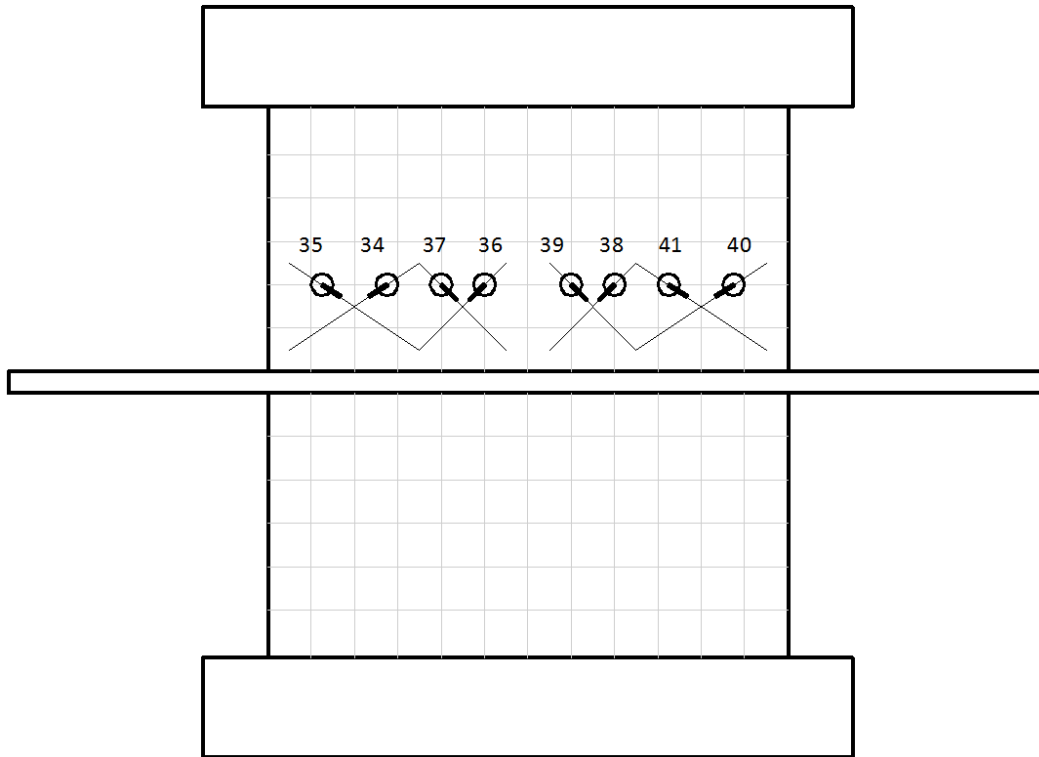


a) LVDT horizontales (H) sobre el canto del muro



b) LVDT verticales (V) sobre la losa

Figura 11. Instrumentación del espécimen vista sobre la cara posterior



c) Micrómetros diagonales (D) sobre el muro

Figura 11 (continuación). Instrumentación del espécimen vista sobre la cara posterior

Protocolo de carga

Para cada espécimen, se aplicó un protocolo de carga controlado por desplazamientos. La historia de desplazamientos utilizada está basada en las recomendaciones del ACI 374 (2013). Estas recomendaciones se basan en el desplazamiento de fluencia del espécimen a ensayar. Con base en algunos resultados de Carrillo *et al.* (2012-2) se estableció, para muros con características similares a las de los especímenes aquí tratados, un desplazamiento de fluencia equivalente a 0.25% de distorsión del muro. Así, el desplazamiento de fluencia considerado para la historia de desplazamientos fue:

$$\varphi_y = 0.0025 H_m = 0.0025 \times 254 = 0.635 \text{ cm} = 6.35 \text{ mm}$$

Los desplazamientos se controlaron con el LVDT H4 (Figura 11a). Sin embargo, bajo el mecanismo de la prueba (Figura 4b), el desplazamiento φ_y se compone de los desplazamientos absolutos del LVDT H4 y el LVDT H3.

Con base en lo anterior, la historia de desplazamientos en el LVDT H4 se muestra en la Figura 12. A partir del desplazamiento de fluencia, antes de cada incremento de desplazamiento indicado en la Figura 12 se hizo un ciclo equivalente a la mitad del ciclo inmediato anterior, esto con el fin de *recenterar* el espécimen y de apreciar la degradación de rigidez en cada ciclo.

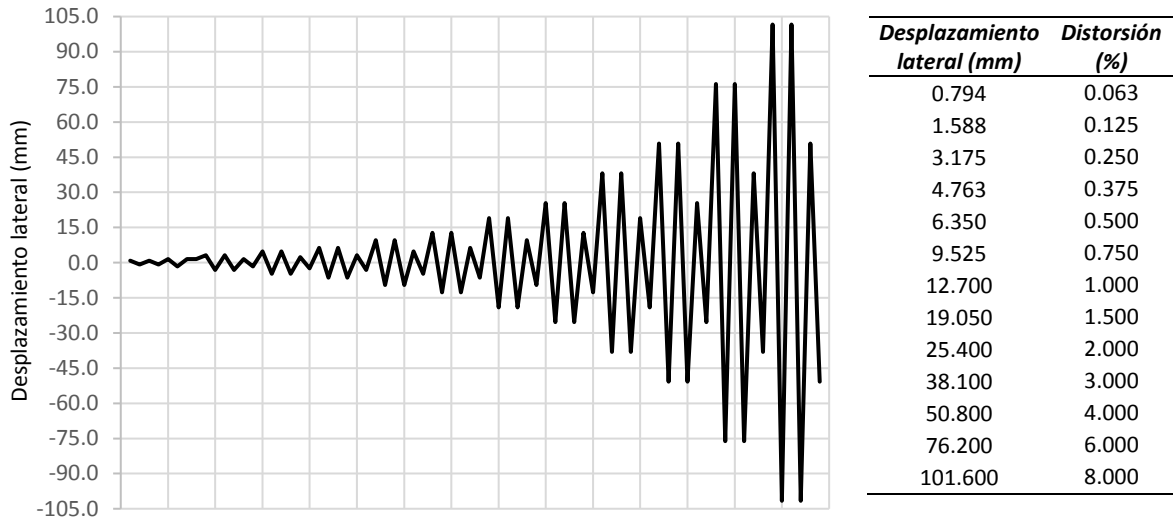


Figura 12. Historia de desplazamientos en LVDT H4

Arreglo experimental

Las pruebas se realizaron en el laboratorio del CENAPRED. El arreglo general del experimento se muestra en la Figura 13.

Para lograr la simulación del modelo matemático de la Figura 4b, los especímenes se apoyaron sobre dos marcos de concreto y se anclaron mediante barras, placas y tuercas de acero (Figura 14).

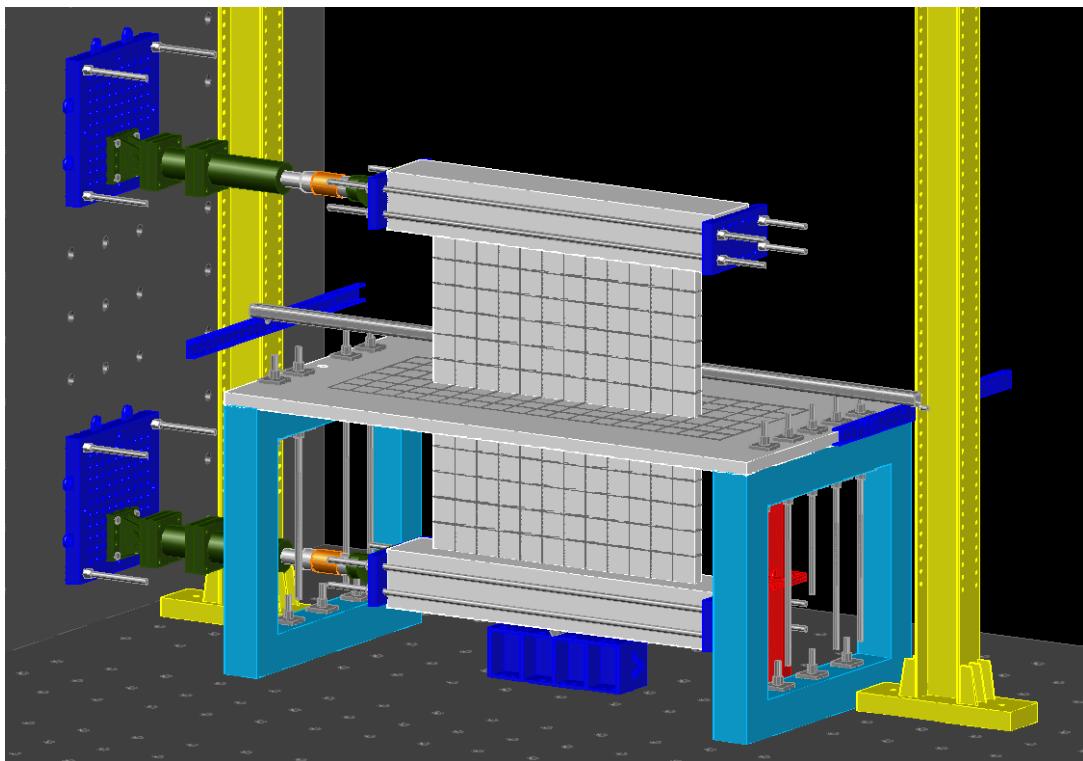


Figura 13. Esquema general de prueba



Figura 14. Bases con marcos de concreto (Créditos: Héctor Guerrero)

Para simular el apoyo móvil inferior (Figura 4b), se colocó una base metálica con un rodillo de acero en el centro del cabezal inferior (Figura 15).

Los gatos hidráulicos se anclaron sobre el muro de reacción del laboratorio mediante placas de acero y aplicaron fuerza en el centro de los cabezales de los especímenes. Para lograr el efecto de la carga reversible, los cabezales se confinaron con barras y placas de acero, sobre una de las cuales se sujetaron los gatos hidráulicos (Figura 16).

Para instalar los micrómetros en la parte posterior del muro superior, se colocaron espárragos de 3/8" y así formar las diagonales correspondientes (Figura 17).

Para instalar los LVDT en la losa, se colocó un perfil HSS a lo largo de toda la losa, sobre un arreglo de columnas y canales que lo sujetaron (Figura 18).

Los LVDT del muro superior se colocaron sobre un arreglo de ángulos y canales soportados por el perfil HSS mostrado en la Figura 18 (Figura 19).

Los LVDT del muro inferior se colocaron sobre dos pedestales metálicos anclados a la losa de reacción (Figura 20).



Figura 15. Rodillo de acero bajo el cabezal inferior (Créditos: Héctor Guerrero)

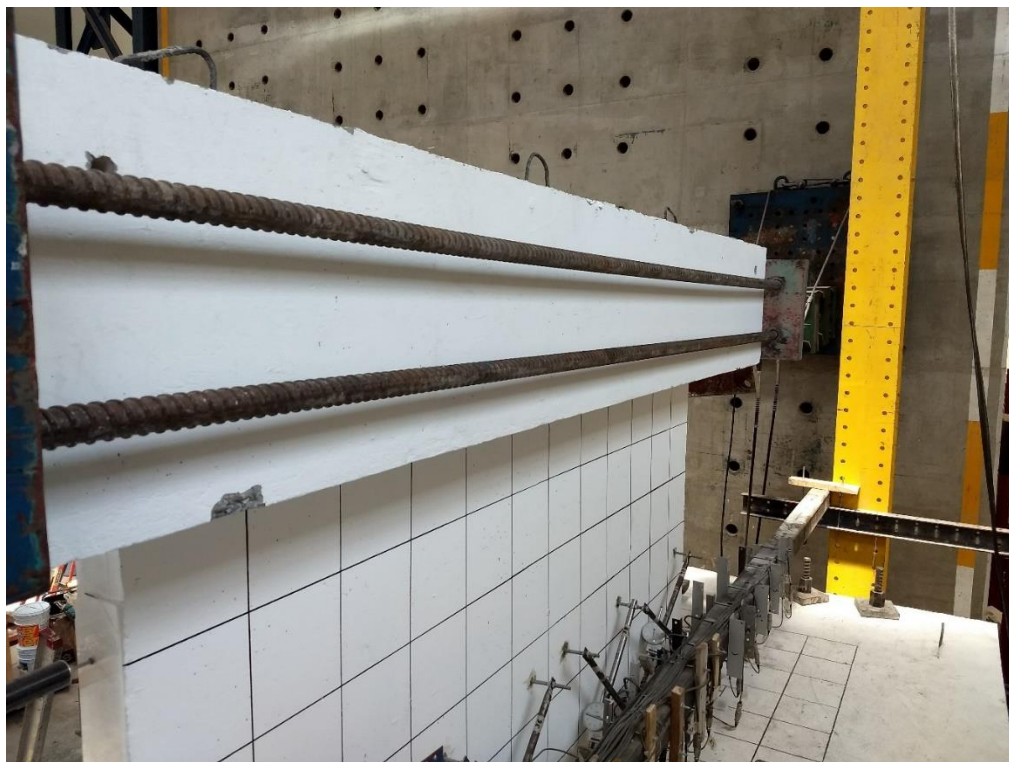


Figura 16. Gato hidráulico superior con placas de confinamiento (Créditos: Luis Morales)



Figura 17. Instalación de micrómetros en el muro superior (Créditos: Juan Gómez)



Figura 18. Instalación de LVDT a lo largo de la losa (Créditos: Luis Morales)



Figura 19. Instalación de LVDT en el muro superior



Figura 20. Instalación de LVDT en el muro inferior (Créditos: Juan Gómez)

Las barras de presfuerzo del muro se colocaron a través de toda la altura el muro y fueron atornilladas con placas, rondanas y tuercas tanto en la parte superior como inferior del espécimen para mantener la compresión aplicada (Figura 21).

Las barras de plomo fueron colocadas directamente sobre la losa, acomodados de forma cuatrapeada para distribuir la carga lo mejor posible sobre toda la losa (Figura 22).

El esquema de prueba se puede apreciar en la Figura 23.

Cabe mencionar que para el espécimen *Fibras 1*, se colocó una parrilla de barras metálicas por debajo de losa del espécimen, y se ancló entre la losa misma y las bases de concreto (Figura 24). Esto se realizó por seguridad ante la incertidumbre del comportamiento de la losa reforzada sólo con fibras de acero.

Los gatos hidráulicos fueron operados mediante una bomba y las fuerzas aplicadas fueron, a medida de lo posible, iguales, pero en sentido opuesto en cada uno de los cabezales. La historia de desplazamientos indicada en la Figura 12 se controló con el transductor H4 (Figura 11a y Figura 24). Los dos gatos hidráulicos, LVDT y micrómetros se conectaron a una consola, y ésta a su vez, se conectó a un equipo de adquisición de datos (TDS) que tomó las lecturas de cada instrumento y gato hidráulico a cada 10 segundos durante las pruebas.

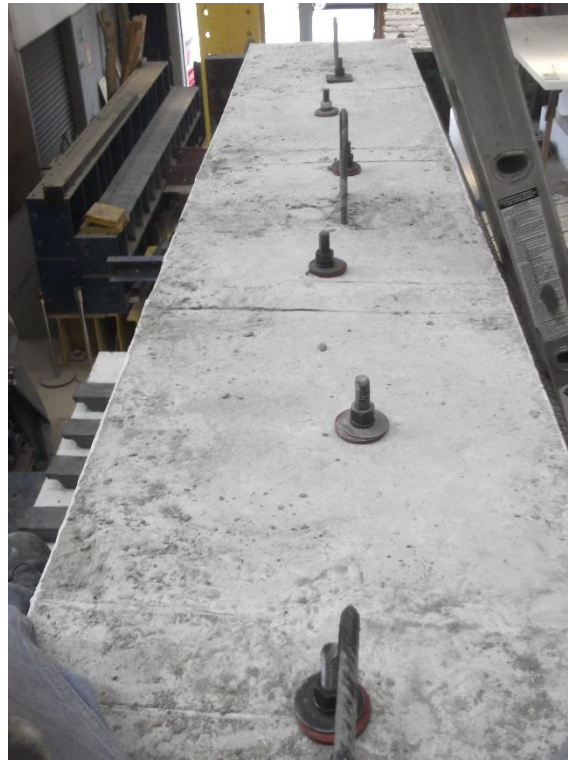


Figura 21. Instalación de las barras de presfuerzo en el muro



Figura 22. Colocación de los lingotes sobre la losa (Créditos: Eduardo Martínez)



Figura 23. Esquema de prueba



Figura 24. Colocación de barras de seguridad (Créditos: Eduardo Martínez)

Detalles de colado de los especímenes

Cada espécimen se construyó en tres etapas. En la primera etapa se coló sólo el cabezal inferior, en la segunda etapa se coló el muro inferior y la losa, y en la última etapa se coló el muro superior y el cabezal superior. En el caso del espécimen *Fibras 1* se colocaron anclas con barras corrugadas para evitar el deslizamiento en las juntas frías (Apéndice A. Detalles de armados). Después de cada colado, el concreto se compactó mediante vibración interna con un vibrador de flecha flexible (de chicote).

El concreto utilizado fue hecho y premezclado en la planta de CEMEX y dispuesto en el laboratorio del CENAPRED. Las fibras se añadieron directamente a la olla y se mezclaron durante aproximadamente 10 minutos antes de colar los especímenes con fibra (*Híbrido y Fibras 1*).

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Testigos

Además de los ensayos de los tres especímenes estudiados, se realizaron pruebas a las barras utilizadas en el presfuerzo del muro. También se realizaron pruebas a muestras del concreto utilizado, en forma de cilindros y vigas.

Barras de presfuerzo

Se ensayaron tres muestras de barras utilizadas en el presfuerzo del muro del espécimen (Figura 25) con un f_y especificado de 3,520 kg/cm². Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras del *Instituto de Ingeniería de la UNAM (ii UNAM)*. Las muestras fueron de 5/8" de diámetro y 85 cm de longitud en promedio. Las gráficas esfuerzo – deformación obtenidas se muestran en la Figura 26, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de ensayos de barras de presfuerzo

Barra	Fluencia		Último	
	f_y (kg/cm ²)	ϕ_y	f_u (kg/cm ²)	ϕ_u
1	3,250	0.0090	4,749	0.1746
2	3,200	0.0090	4,784	0.1816
3	3,194	0.0090	4,765	0.1859
Promedios	3,215 (CV = 0.79%)	0.0090 (CV = 0.03%)	4,766 (CV = 0.30%)	0.1807 (CV = 2.56%)

CV = Coeficiente de variación



Figura 25. Ensayo de barras de presfuerzo (Créditos: Héctor Guerrero)

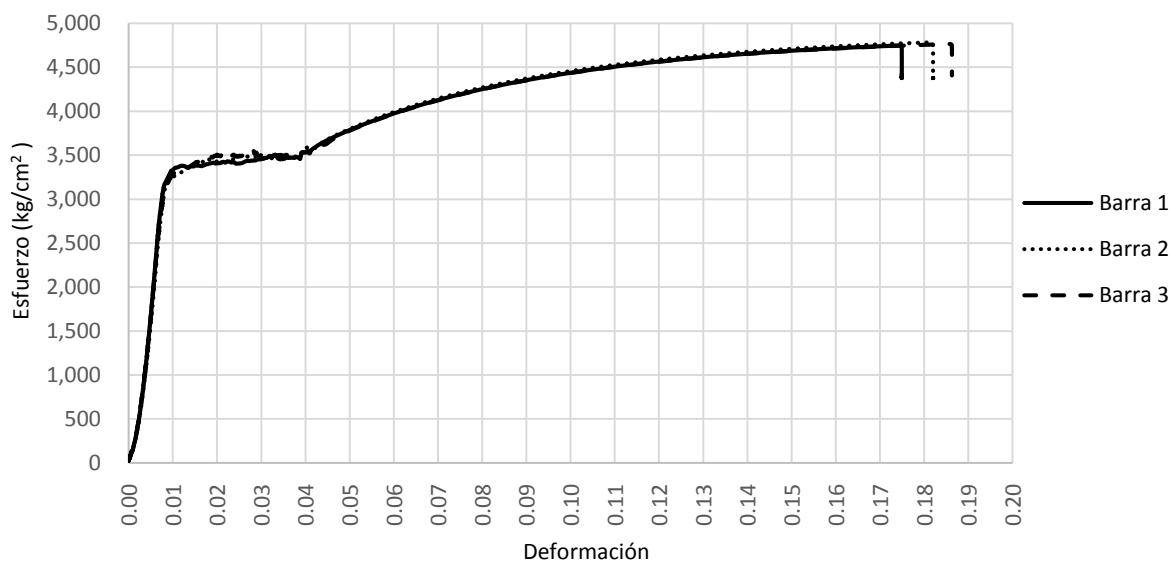


Figura 26. Curvas esfuerzo – deformación de barras de presfuerzo

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados, ninguna barra alcanzó el f_y especificado (el cual, según el fabricante, es de $3,520 \text{ kg/cm}^2$) antes de que presentaran el endurecimiento por deformación.

Cilindros de concreto

Del concreto utilizado en la construcción de los tres especímenes se tomaron muestras y se ensayaron tres cilindros de concreto sin fibras y 15 cilindros de CRFA con dosificación de 30 kg/m^3 (Figura 27), todos con un f'_c de 350 kg/cm^2 . Los ensayos fueron realizados bajo las recomendaciones de la ASTM C-39. Los ensayos se controlaron por carga y la velocidad promedio de aplicación fue de 25 t/min . Cabe mencionar que en tres de los 15 cilindros de CRFA se obtuvieron datos no confiables (lecturas erróneas en los LVDT utilizados) y no se incluyeron esos resultados. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras del ii UNAM. Todos los cilindros fueron de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Por errores de procedimiento, no se calculó el peso específico de ninguna muestra de concreto.

El proceso de prueba y la obtención de resultados para todos los cilindros se realizaron de la siguiente manera:

- Primero se cargó el cilindro a un esfuerzo del 40% del f'_c (25 t).
- Después se descargó el cilindro hasta un esfuerzo del 3.25% del f'_c (2.0 t).
- Luego se cargó el cilindro hasta la falla.
- La gráfica correspondiente se dibujó a partir del punto más bajo de descarga (2.0 t) con una ordenada correspondiente (deformación) de cero.
- Para obtener el módulo de elasticidad (E_c), se utilizó el punto más bajo de descarga (2.0 t) y el punto correspondiente a un esfuerzo del 40% del f'_c (25 t) después de haber realizado la descarga.

Las gráficas esfuerzo – deformación obtenidas se muestran en la Figura 28, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.



Figura 27. Ensayo de cilindros de concreto

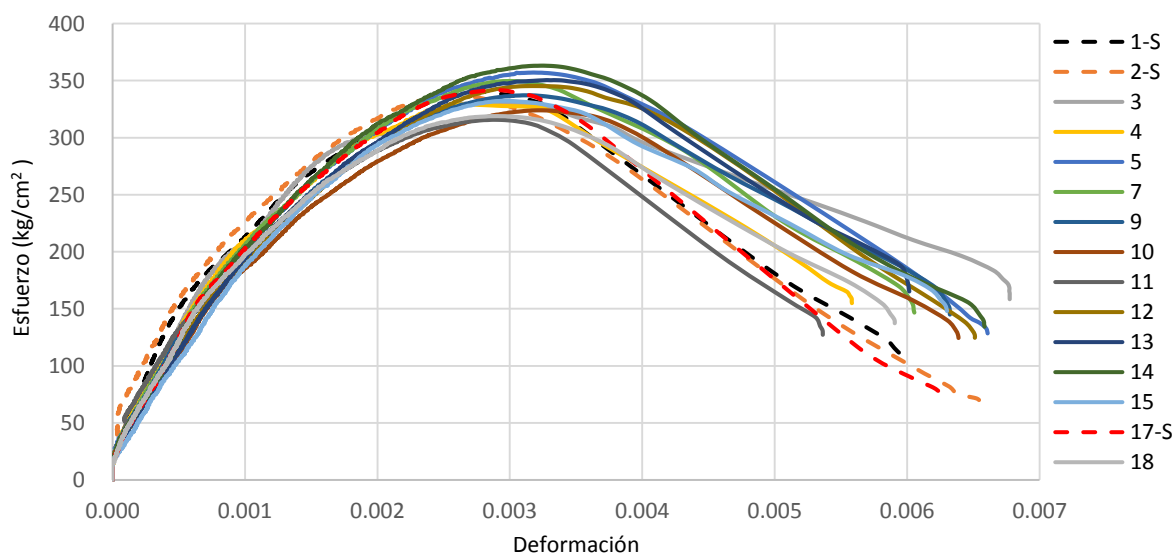


Figura 28. Curvas esfuerzo – deformación de cilindros de concreto

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados a la edad de 28 días del concreto, en promedio ninguno de los dos tipos de cilindros (con fibras y sin fibras) alcanzó el f'_c especificado (350 kg/cm^2), sin embargo, los valores son muy parecidos entre sí. Con respecto al E_c , el promedio de los cilindros de CR es similar al proporcionado por las NTC Concreto (2017), es decir $14,000\sqrt{f'_c}$.

sin embargo, el promedio de los cilindros de CRFA fue aproximadamente 20% menor que el de los cilindros de CR.

Tabla 12. Resultados de ensayos de cilindros de concreto

<i>Cilindro</i>	<i>f'c (kg/cm²)</i>	<i>ε_{cu}</i>	<i>E_c (kg/cm²)</i>
1-S*	340.16	0.0028	277,964
2-S*	336.92	0.0026	309,042
3	330.66	0.0030	234,890
4	329.25	0.0026	233,448
5	357.11	0.0032	219,120
7	349.68	0.0030	226,449
9	337.18	0.0031	220,685
10	324.02	0.0032	193,411
11	315.72	0.0029	224,990
12	345.30	0.0032	201,419
13	350.47	0.0033	195,907
14	363.14	0.0033	215,815
15	332.42	0.0030	180,232
17-S*	341.79	0.0029	223,079
18	318.93	0.0029	213,223
Promedios:			
<i>Sin fibra</i>	339.62 (CV = 0.60%)	0.0028 (CV = 4.28%)	270,028 (CV = 13.16%)
<i>Con fibra</i>	337.82 (CV = 4.32%)	0.0031 (CV = 6.19%)	213,299 (CV = 7.67%)
	99.47% del CS	110.71% del CS	78.99% del CS

(*)-S = Sin fibras

CV = Coeficiente de variación

Vigas de CRFA

Se ensayaron cuatro vigas de CRFA con dosificación de 30 kg/m³ (Figura 29), con un f'c de 350 kg/cm². Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras del ii UNAM y se hicieron bajo la NMX-C-488 (2014) (apéndice normativo basado en la EN 14651). Todas las vigas tenían ranura en el centro del claro y fueron de sección cuadrada de 15×15 cm y 70 cm de longitud aproximadamente (con 50 cm de distancia entre los apoyos). Se colocaron 2 LVDT, uno a cada lado de las vigas. Los ensayos se controlaron por desplazamiento y la velocidad promedio de aplicación fue de 1 mm/min. Las gráficas esfuerzo – ductilidad de desplazamiento obtenidas se muestran en la Figura 30, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de ensayos de vigas de CRFA

<i>Viga</i>	<i>f_{max} (kg/cm²)</i>
1	60.38
2	84.26
3	75.81
4	68.80
Promedio	72.31 (CV = 12.165)
Bekaert	50.97

CV = Coeficiente de variación

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados, el esfuerzo máximo promedio obtenido en las vigas es aproximadamente 30% mayor que el reportado por Bekaert, debido quizás

a la diferencia de resistencia del concreto, la cual fue de 50 kg/cm^2 más que el usado por el fabricante de las fibras. Sin embargo, los resultados entre las vigas ensayadas son un poco dispersas tanto en esfuerzos como en desplazamientos. Lo anterior puede deberse a que la distribución de las fibras en el concreto no siempre es perfectamente homogénea, además en algunos casos quedan fibras sin despegarse del todo, haciendo paquetes de tres o hasta cuatro fibras pegadas (Figura 48).

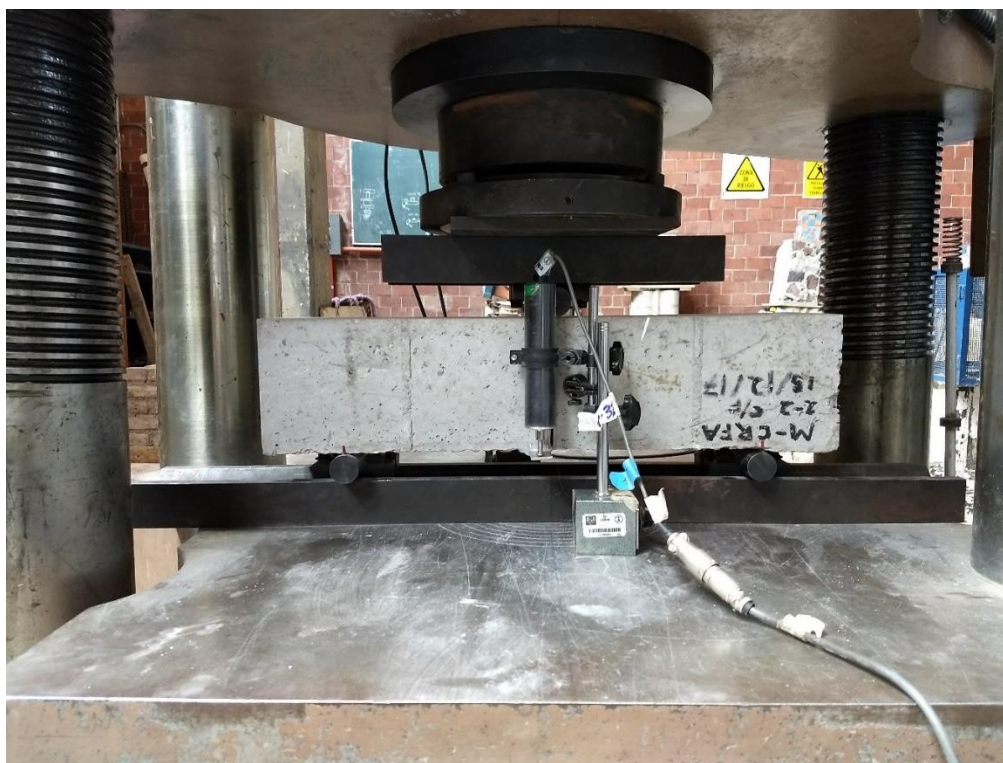


Figura 29. Ensayo de vigas de CRFA (Créditos: Luis Morales)

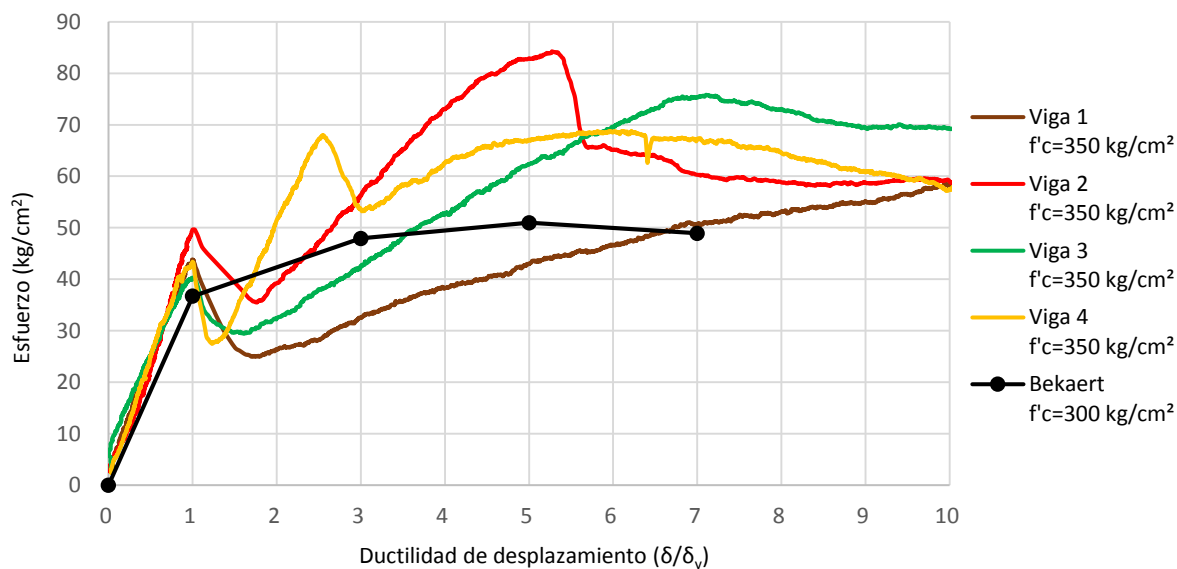
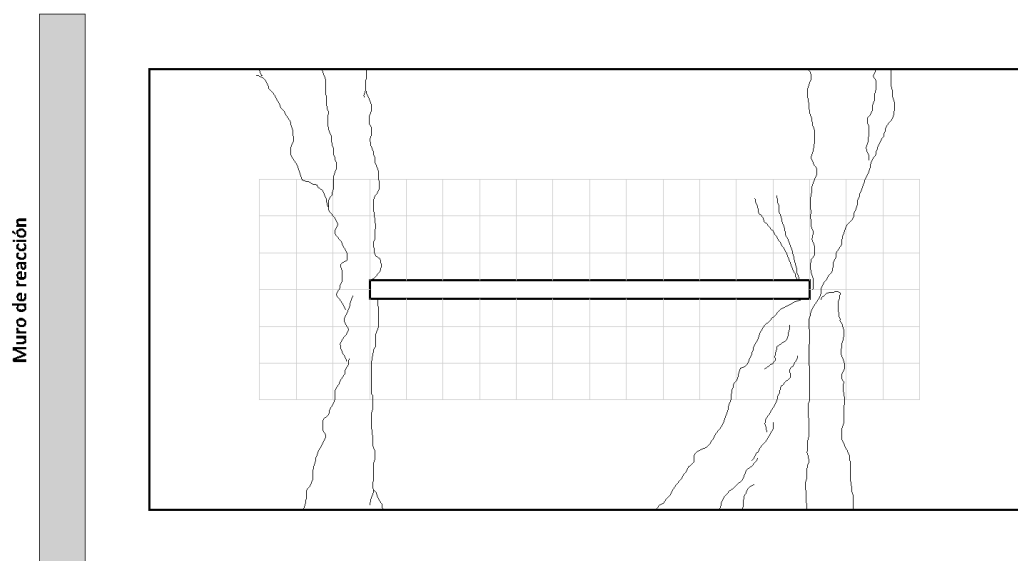
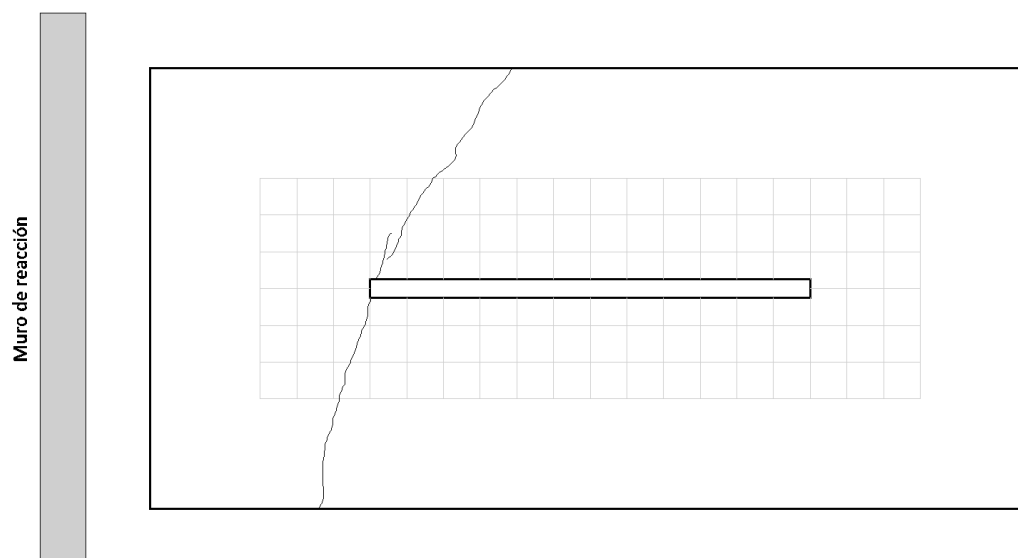


Figura 30. Curvas esfuerzo – ductilidad de desplazamiento de vigas de CRFA (30 kg/m^3)

Especímenes ensayados

Se ensayaron tres especímenes con las características mostradas en la Figura 5 y en la Tabla 9, bajo el esquema de prueba mostrado en la Figura 23 y controlados por la historia de desplazamientos de la Figura 12. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED. Las bitácoras de ensayo de los tres especímenes se pueden consultar en el Apéndice C. Bitácoras de ensayo. En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos de los tres especímenes ensayados.

Condiciones iniciales**a) Especimen Control****b) Especimen Fibras 1****Figura 31. Grietas previas a los ensayos (vista desde abajo)**

Previo a los ensayos, los especímenes *Control* y *Fibras 1* presentaron agrietamiento en la parte inferior de la losa. El ancho de estas grietas fue de 0.1 mm. la Figura 31 muestra la distribución de las grietas previas a los ensayos en los especímenes mencionados. Ningún espécimen presentó agrietamiento en los muros previo a los ensayos.

La aparición de estos agrietamientos se dio en el transporte de los especímenes, específicamente al momento de montar los especímenes en los marcos de apoyo (Figura 14).

Curvas cortante – distorsión

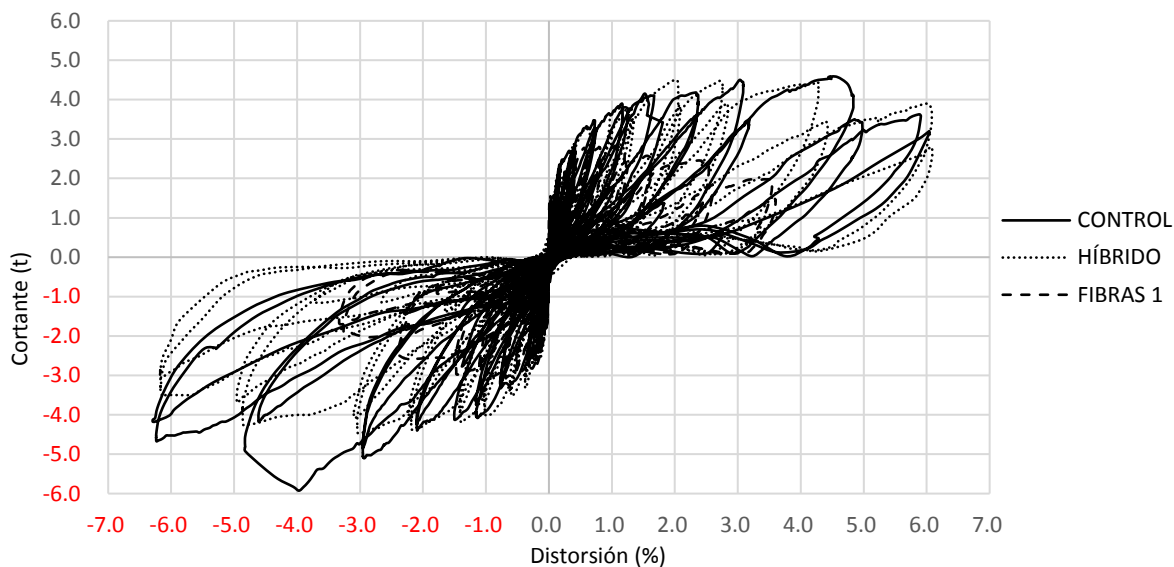


Figura 32. Curvas histeréticas cortante – distorsión

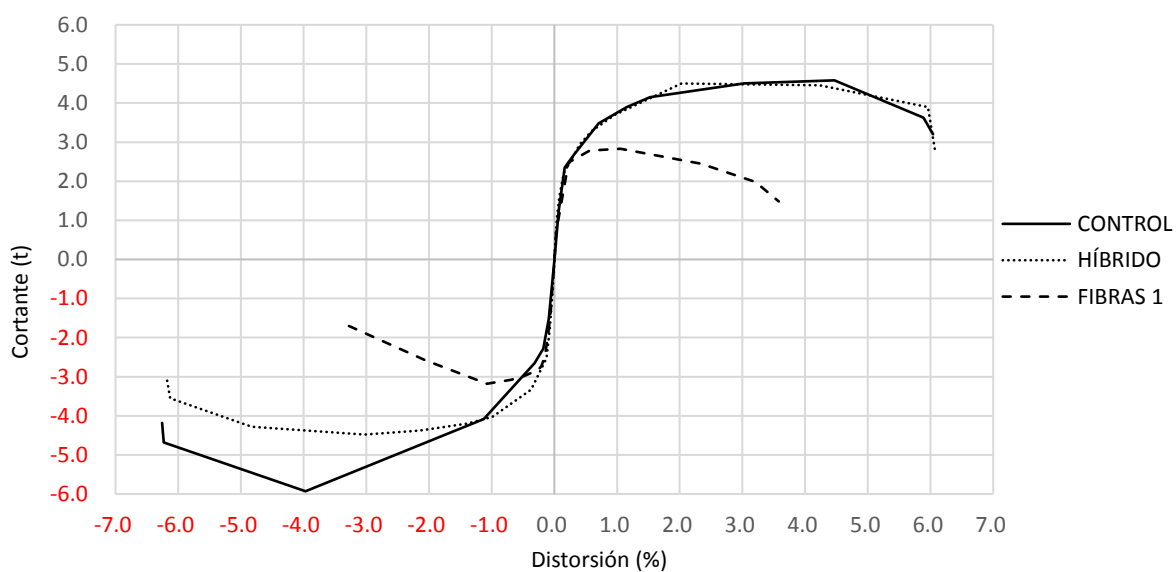


Figura 33. Envoltentes del comportamiento histerético cortante – distorsión

En la Figura 32 se muestra la comparación del comportamiento histerético de las curvas cortante – distorsión de los tres especímenes ensayados. En la Figura 33 se muestran las envolventes de dicho comportamiento. En la Tabla 14 se presenta el cortante máximo y distorsión medidos en cada espécimen.

Tabla 14. Cortantes máximos en los especímenes

Especímen	Nombre	Positivo		Negativo	
		Cortante (t)	Distorsión (%)	Cortante (t)	Distorsión (%)
1	Control	4.58	4.47	-5.93	-3.97
2	Híbrido	4.50	2.03	-4.48	-3.03
3	Fibras 1	2.83	1.05	-3.18	-1.08

De acuerdo con los ensayos realizados (Figura 32), los tres especímenes presentaron un comportamiento histerético razonablemente simétrico con respecto a los ciclos positivos y negativos. Se observa que el desplazamiento de fluencia utilizado para establecer la historia de desplazamientos (Figura 12) fue razonablemente aceptable. También se observa un efecto aparentemente *recentrante* en el cambio de dirección de la fuerza aplicada.

Se observa que el comportamiento de los especímenes *Control* e *Híbrido* son similares, con excepción de la envolvente negativa después de la distorsión del 2% (Figura 33), donde el espécimen *Control* presentó un incremento del cortante con respecto al espécimen *Híbrido*. Esto puede deberse al proceso de colocación de las barras durante la construcción, ya que los constructores comúnmente arman las parrillas de barras de manera *cuatrapeada* (Figura 46), además de que, para este caso, la parrilla quedó por debajo del eje neutro de la losa (Figura 47). Sin embargo, ambos especímenes (*Control* e *Híbrido*) presentaron incrementos de cortante en el primer ciclo de cada incremento de desplazamiento aplicado.

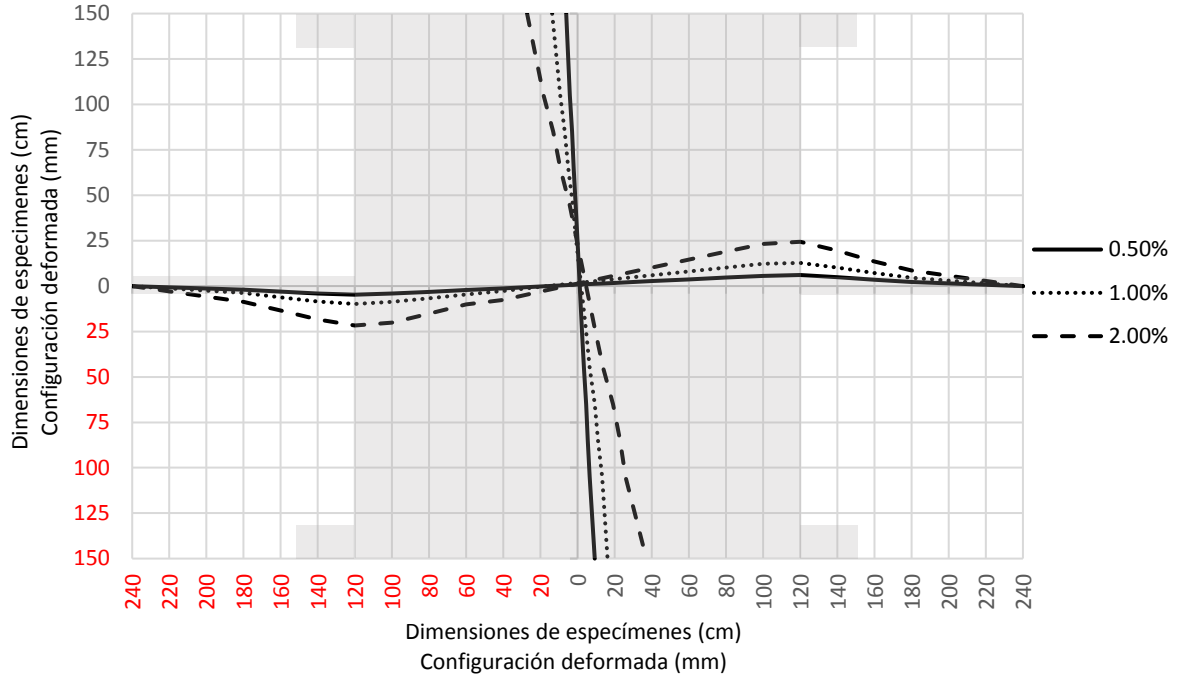
El espécimen *Fibras 1* fue el que presentó la degradación más evidente de los tres especímenes, razón por la cual la prueba sólo se realizó hasta una distorsión de 3.5% aproximadamente (Figura 33).

Configuración deformada de los especímenes

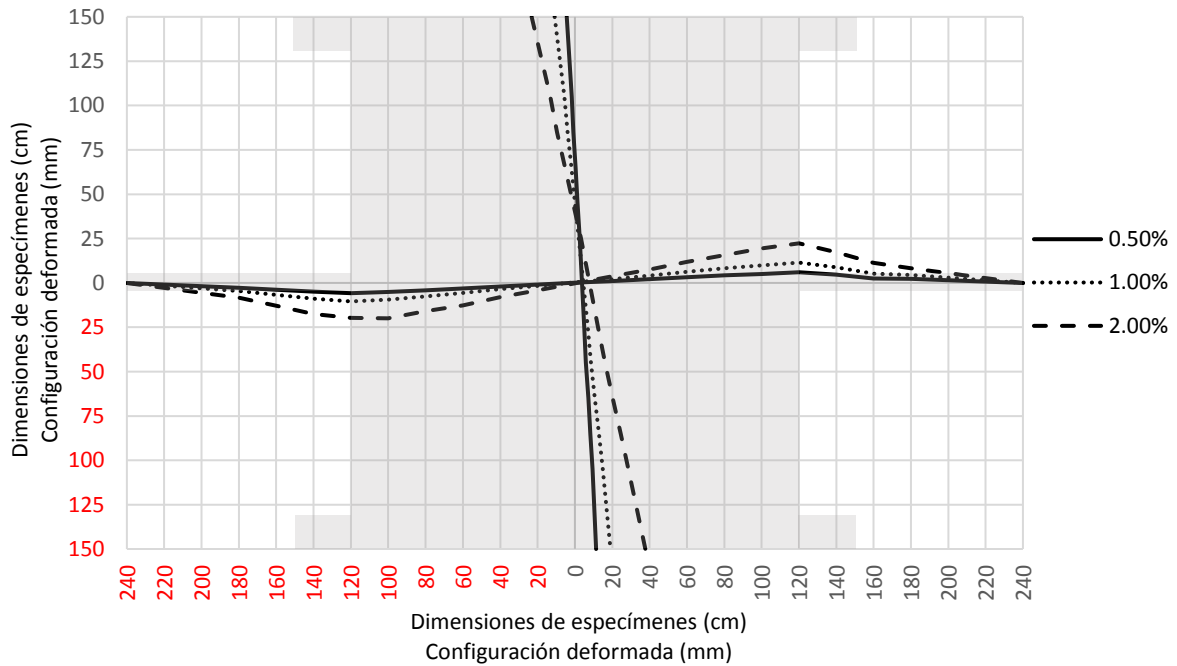
Los desplazamientos registrados por los micrómetros (desplazamientos diagonales sobre el muro superior) en los tres especímenes conducen a una distorsión angular máxima de aproximadamente 1.25×10^{-5} . En la Figura 34 se muestran las configuraciones deformadas de los especímenes a los niveles 0.5%, 1.0% y 2.0% de distorsión.

Tabla 15. Cortantes correspondientes a los niveles de distorsión 0.5%, 1.0% y 2.0% (t)

Distorsión (%)	Control	Híbrido	Fibras 1
0.5	3.15	3.18	2.63
1.0	3.63	3.25	2.78
2.0	4.03	4.50	2.38

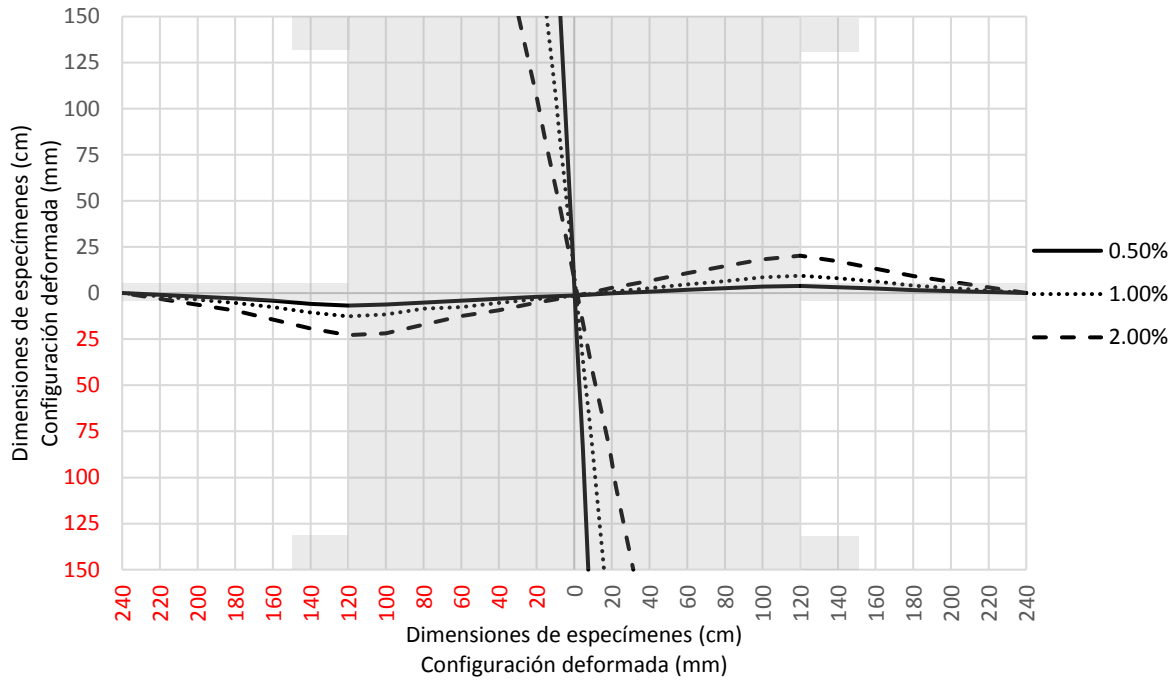


a) *Espécimen Control*



b) *Espécimen Híbrido*

Figura 34. Deformada de especímenes a distintos niveles de distorsión



c) *Especímen Fibras 1*

Figura 34 (continuación). Deformada de especímenes a distintos niveles de distorsión

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados, los muros de los tres especímenes no tuvieron deformaciones significativas y no aparecieron grietas sobre estos durante las pruebas. Aparentemente los muros se movieron como elemento rígido rotando solamente.

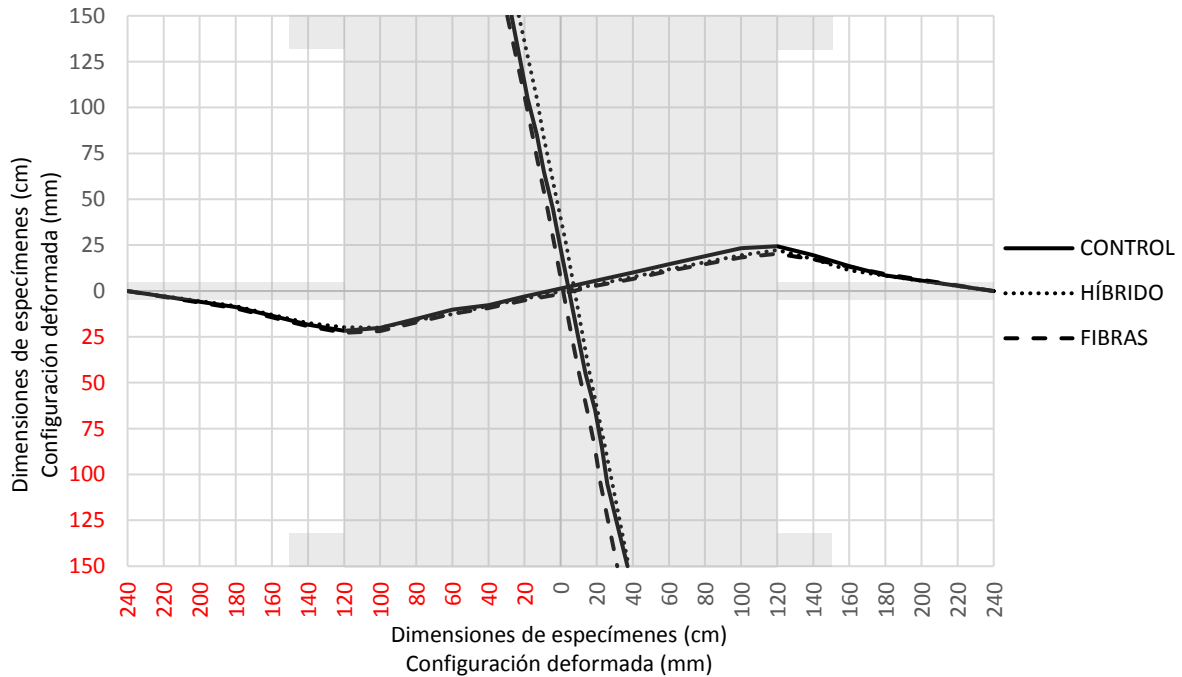


Figura 35. Deformada de especímenes a 2% de distorsión



a) Espécimen Control



b) Espécimen Híbrido

Figura 36. Especímenes deformados en su último incremento de desplazamiento (Créditos: Héctor Guerrero)



c) Espécimen Fibras 1

Figura 36 (continuación). Especímenes deformados en su último incremento de desplazamiento (Créditos: Héctor Guerrero)

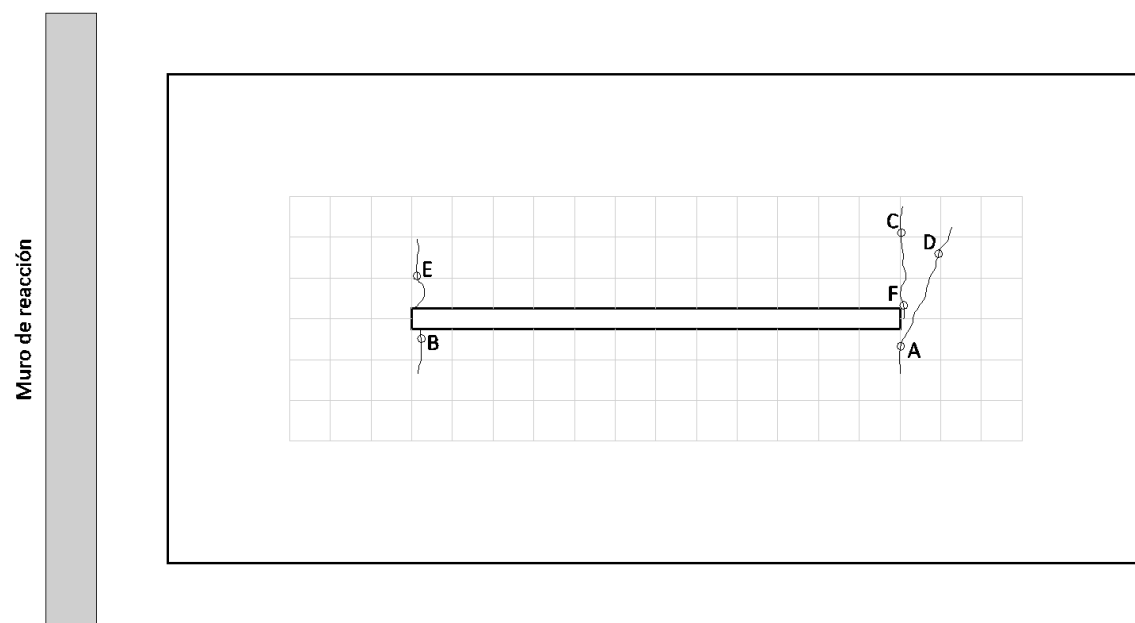
Se encontró que, según las lecturas de los LVDT, las configuraciones deformadas de los tres especímenes para cada nivel de distorsión son muy parecidas entre sí. En la Figura 35 se compara la deformada de los tres especímenes a una distorsión del 2%. Esto puede deberse a que los LVDT sobre la losa fueron colocados en la vecindad del muro de los especímenes y hacen que la losa sea más rígida en esta zona. Sin embargo, el cortante asociado varía especialmente en el espécimen *Fibras 1* con respecto a los otros dos especímenes (Tabla 15). Esto era de esperarse debido a la degradación de resistencia mostrada por este último espécimen (Figura 33).

Como lo muestra la Figura 36, visualmente la deformada de la losa en las partes más alejadas del muro, a grandes distorsiones mostraron un comportamiento en *zig-zag* muy suavizado para el espécimen *Control* y prácticamente nada suavizado para el espécimen *Fibras 1*. El espécimen *Híbrido* presentó un comportamiento intermedio entre los anteriores.

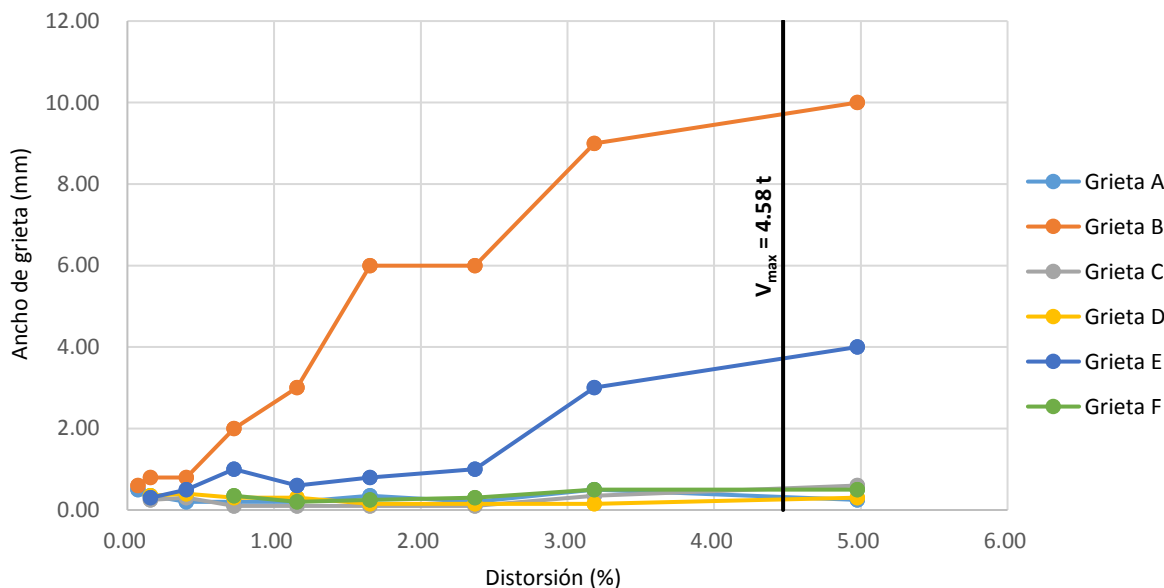
Evolución de grietas registradas

En el ensayo de cada espécimen, se eligieron algunas grietas y se registró el ancho de estas a lo largo de la prueba. De la Figura 37 a la Figura 39 se muestra la evolución de dichas grietas en ciclos de carga positivos. La escala vertical de los esquemas en estas figuras es diferente para cada una de ellas.

Como era de esperarse, a mayor distorsión, las grietas registradas fueron cada vez más anchas en los tres especímenes. Sin embargo, en los especímenes con fibra, para los semi-ciclos opuestos a la tendencia de apertura de grietas, estas tendieron a cerrarse. En el espécimen *Híbrido* fue más evidente este fenómeno, es decir, las fibras estaban trabajando a tal grado que las grietas se cerraron hasta desaparecer por completo. La Figura 40 muestra la comparación de las grietas que tuvieron mayor ancho en cada uno de los especímenes.

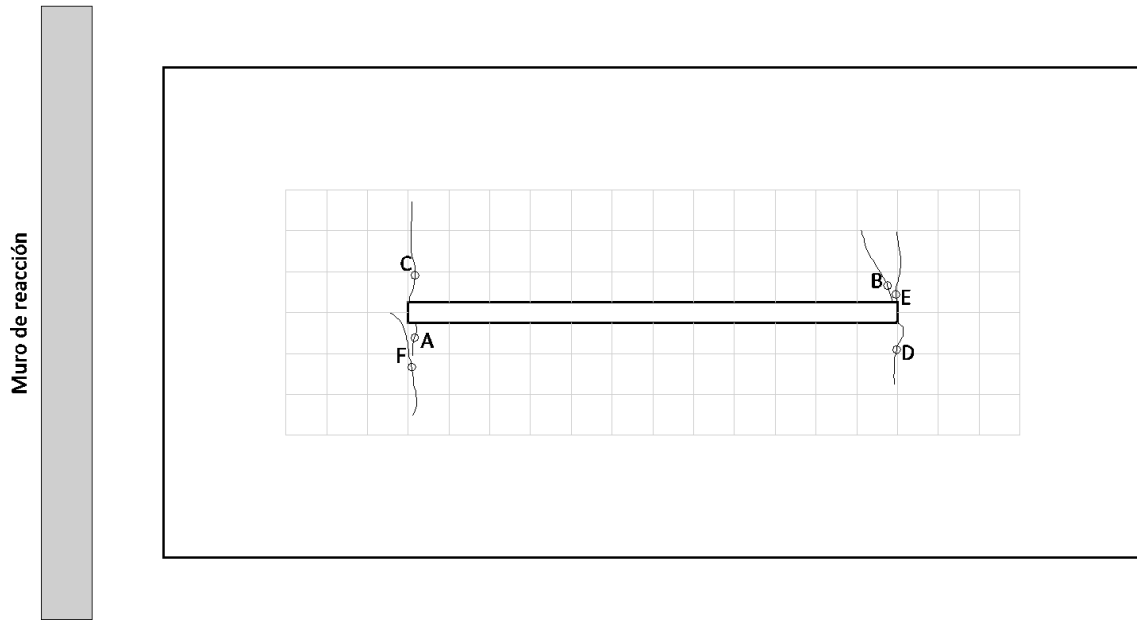


a) Localización de grietas (Control)

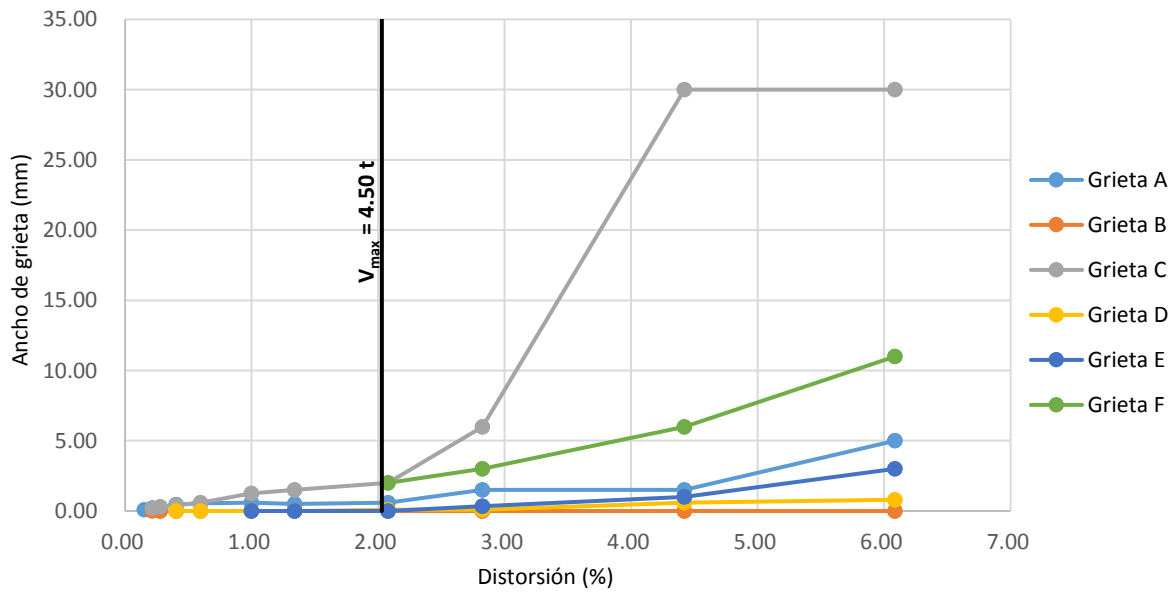


b) Evolución de las grietas registradas (Control)

Figura 37. Agrietamiento en espécimen Control

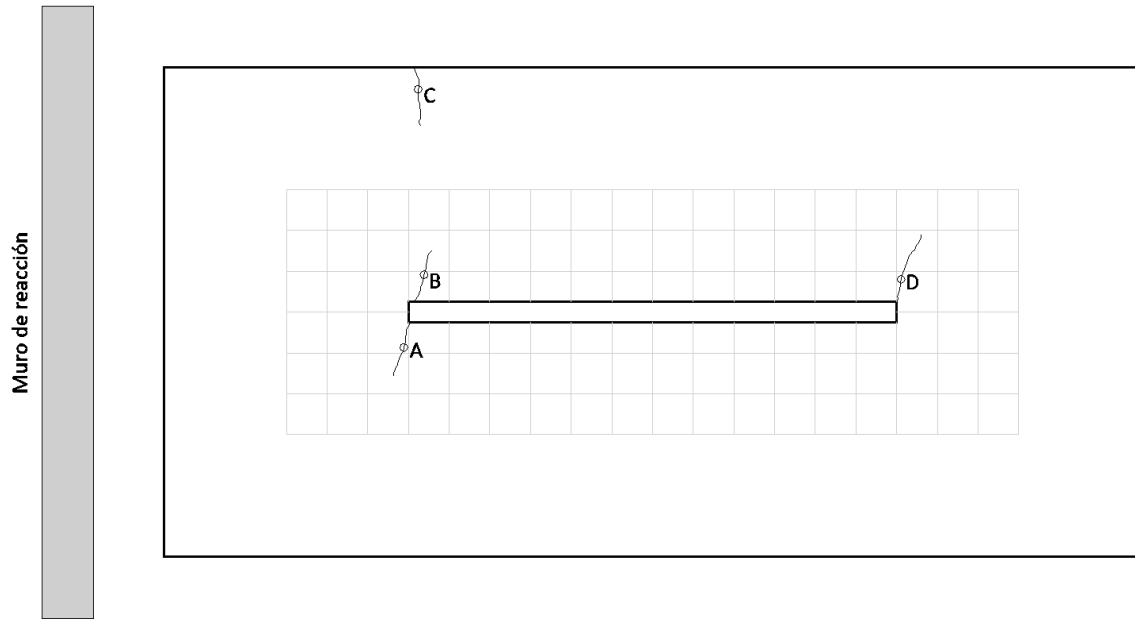


a) Localización de grietas (Híbrido)

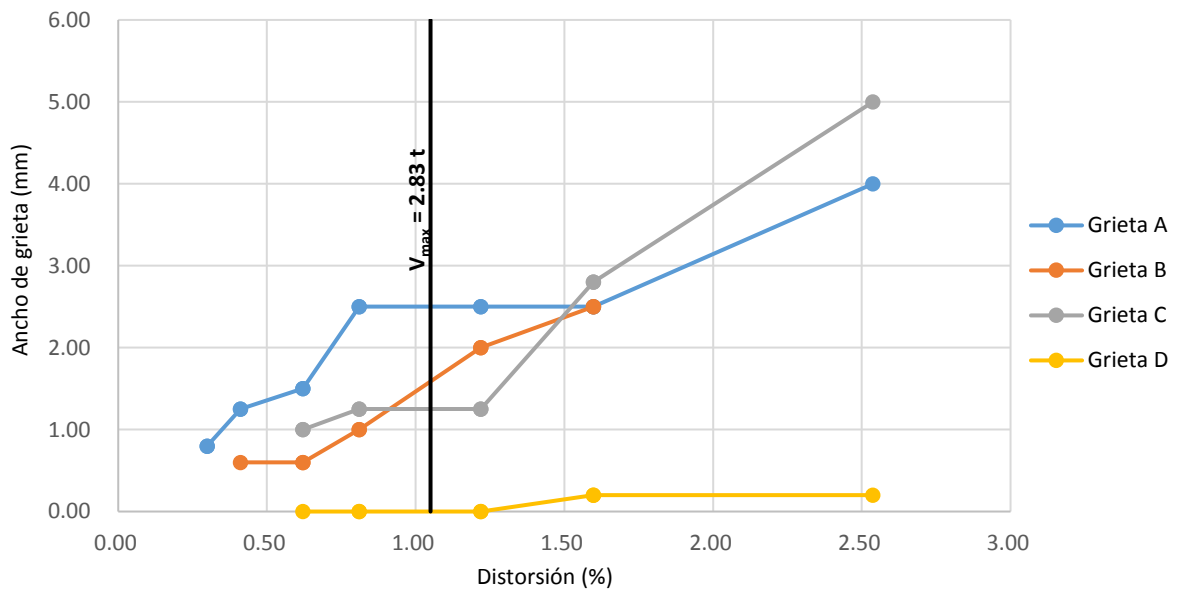


b) Evolución de las grietas registradas (Híbrido)

Figura 38. Agrietamiento en espécimen Híbrido



a) Localización de grietas (Fibras 1)



b) Evolución de las grietas registradas (Fibras 1)

Figura 39. Agrietamiento en espécimen Fibras 1

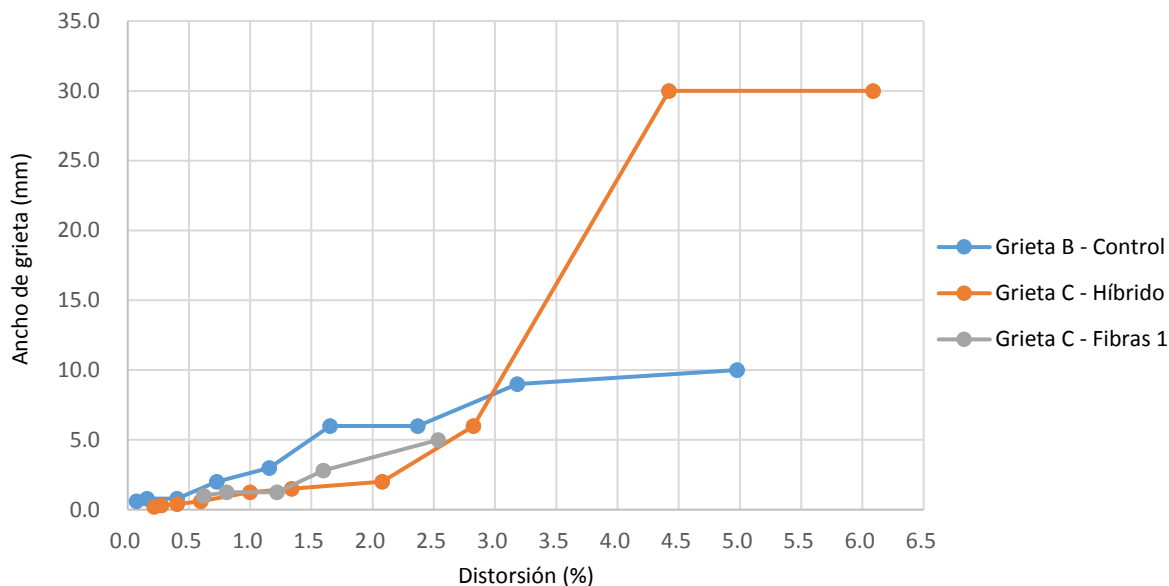


Figura 40. Comparación de grietas más anchas entre los especímenes

De acuerdo con la Figura 40, a grandes distorsiones de entrepiso, el espécimen Híbrido presentó un ancho de grieta mayor en comparación con el espécimen *Control*. Desafortunadamente, por cuestiones de seguridad, no se pudo registrar la grieta más ancha del espécimen *Fibras 1* a esos niveles de distorsión de entrepiso.

Daño visual en los especímenes

De la Figura 41 a la Figura 43 se muestra el daño visual en los tres especímenes a distorsiones de 0.5%, 1.0% y 2.0% respectivamente.

Como era de esperarse y según el diseño del experimento, el daño y consecuentemente la falla se presentó en la losa de los especímenes, concentrándose en la periferia de las uniones muro – losa. Para el espécimen *Control*, el daño se distribuyó en varias grietas en forma de abanico naciendo del canto del muro y hacia los bordes de la losa. A medida que aumentó la distorsión, el daño se percibió muy considerable (Figura 43a). En el espécimen *Híbrido* no hubo tantas grietas y el daño se concentró principalmente en una grieta en cada extremo del muro, la cual se extendió de manera perpendicular al muro a lo largo de toda la losa, con un ancho mayor a las demás, y coincidió con una barra colocada en el mismo lugar (Figura 43b). En el espécimen *Fibras 1* el daño se concentró prácticamente sólo en una grieta en cada extremo del muro de un ancho considerable, la cual se extendió de manera perpendicular al muro a lo largo de toda la losa (Figura 43c).



a) *Espécimen Control*

b) *Espécimen Híbrido*

c) *Espécimen Fibras 1*

Figura 41. Daño visual a 0.5% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)

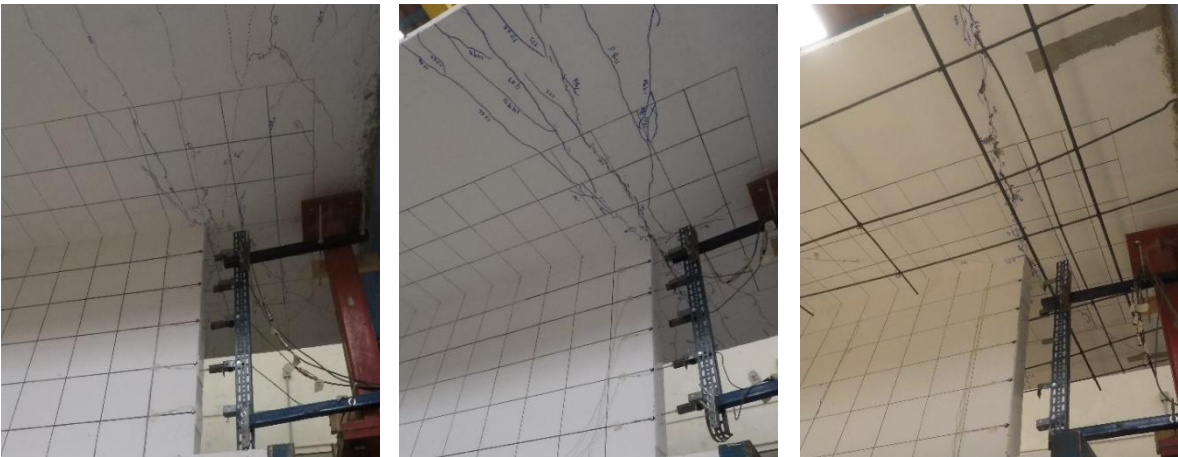


a) *Espécimen Control*

b) *Espécimen Híbrido*

c) *Espécimen Fibras 1*

Figura 42. Daño visual a 1.0% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)



a) *Espécimen Control*

b) *Espécimen Híbrido*

c) *Espécimen Fibras 1*

Figura 43. Daño visual a 2.0% de distorsión (Créditos: Héctor Guerrero)

En la vecindad de la superficie del concreto de la losa, las fibras evitaron el leve desconchamiento del concreto haciendo una especie de escamas de recubrimiento en la losa (Figura 44).



Figura 44. Efectos de la fibra en el concreto de la superficie

Contribución de las fibras a la resistencia del concreto

En la Figura 45 se muestra la comparación de las envolventes positivas de las gráficas positivas cortante – distorsión de los tres especímenes.

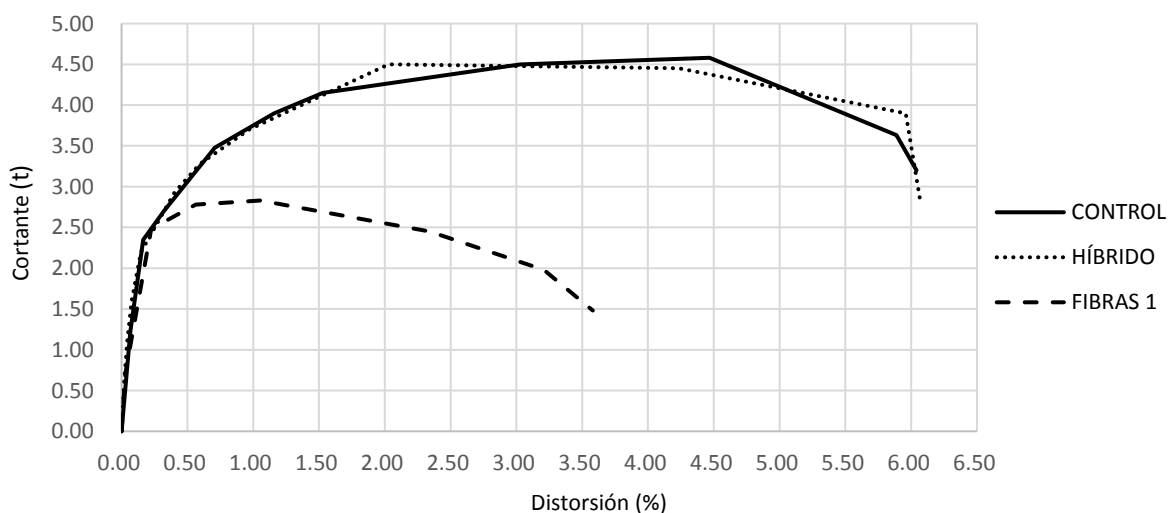


Figura 45. Envolventes positivas cortante – distorsión de especímenes

De acuerdo con la Figura 45, el uso de fibras en el espécimen *Híbrido* compensó la disminución de la cuantía con respecto al espécimen *Control*, logrando un comportamiento histerético similar entre

estos dos especímenes. El uso de sólo las fibras como refuerzo en el espécimen *Fibras 1* presentó una mayor y más temprana degradación de rigidez que la de los otros dos especímenes (*Control* e *Híbrido*). Sin embargo, se puede apreciar que hasta una distorsión de entrepiso de 0.5% el comportamiento de los tres especímenes es similar. Hasta este nivel de distorsión, el refuerzo sólo con fibras se podría usar para sistemas con factores de comportamiento sísmico muy bajos (zonas de bajo peligro sísmico). Después de 0.5% de distorsión de entrepiso el comportamiento empieza a diferir.

Inspección visual post-prueba

Después de los ensayos se demolieron cuidadosamente las losas de los especímenes y se checaron algunas cuestiones de construcción. La parrilla de barras corrugadas en la losa del espécimen *Control* se hizo de manera cuatrapeada haciendo que el peralte efectivo del refuerzo variara a lo largo de la losa (Figura 46).



Figura 46. Colocación cuatrapeada del armado de la losa del espécimen Control

Además de estas variaciones, las parrillas de los especímenes *Control* e *Híbrido* quedaron colados por debajo de la mitad del espesor de las losas (Figura 47), haciendo la variación del espécimen *Control* un poco mayor en el cuadrante negativo (Figura 33).



a) Espécimen Control



b) Espécimen Híbrido

Figura 47. Profundidad real del armado de losa

Con lo que respecta a las fibras, aun cuando la adición de las fibras se hizo directamente en la olla de premezclado y estas se mezclaron con el concreto durante aproximadamente 10 minutos, se encontraron algunas partes con mayor concentración e incluso algunos paquetes de tres o hasta cuatro fibras que no se pudieron separar en el proceso de mezclado (Figura 48). Quizás un tiempo mayor de mezclado resultaría en una distribución de fibras más homogénea.



Figura 48. Distribución aleatoria de fibras en el concreto

Gracias al modo de falla en uno de los lados de la losa del espécimen *Fibras 1*, se pudo conocer la cantidad de fibras que pasaron por dicha línea de falla. Se contaron 848 fibras entre las dos secciones divididas por la falla. De acuerdo con la ficha técnica de las fibras (Bekaert, 2017) cada fibra tiene un diámetro equivalente igual a 0.9 mm. Con base en estos datos, se calculó una cuantía de fibras ($\rho = A_{fibra}/A_{concreto}$) de aproximadamente de 0.00225, que es casi 3.5 veces la cuantía que se tendría si se reforzara la losa con una capa simple de malla electrosoldada 6×6/10-10.

5 DISCUSIÓN

Ensayos de cilindros de concreto

En la Tabla 16 se muestran los resultados de los ensayos de cilindros de CRFA y los obtenidos con las ecuaciones propuestas de Carrillo *et al.* (2016). Cabe mencionar que en todos los ensayos (cilindros, vigas y muros) realizados por Carrillo *et al.* (2016) se utilizó concreto clase 1 Estructural (según las NTC Concreto, 2004).

Tabla 16. Resultados experimentales y teóricos de los ensayos de cilindros de CRFA

	<i>Sin fibra (CS)</i>			<i>Con fibra (CRFA)</i>		
	f'_c (kg/cm ²)	ϵ_{cu}	E_c (kg/cm ²)	f'_c (kg/cm ²)	ϵ_{cu}	E_c (kg/cm ²)
Ensayos (promedios)	339.62	0.0028	270,028	337.82	0.0031	213,299
Carrillo <i>et al.</i> (2016)	350.00	0.0037	149,865	304.50	0.0038	149,692

La resistencia experimental a compresión del CS (sin fibras) fue aproximadamente 3% menor a la resistencia especificada por el proveedor, en este caso CEMEX, la cual fue de 350 kg/cm². Para fines prácticos, esta disminución no es significativa, aunque generalmente las resistencias experimentales están un poco por arriba del valor especificado. Quizás pueda deberse al proceso de mezclado o fabricación por parte de CEMEX, o por el proceso de muestreo de los cilindros.

La resistencia experimental a compresión del CRFA, en comparación con la resistencia experimental a compresión del CS es aproximadamente 0.5% menor, y en comparación con la resistencia especificada a compresión del CS es aproximadamente 3.5% menor. Sin embargo, si se considera que la resistencia real del CS es la obtenida experimentalmente, el CRFA no presentó la disminución de resistencia observada en los trabajos estudiados en la revisión bibliográfica, la cual es aproximadamente del 10%. La disminución propuesta por Carrillo *et al.* (2016), para los valores del presente trabajo es del 13%, como lo muestra la Tabla 16.

La consideración de la deformación unitaria en la resistencia a compresión propuesta por Carrillo *et al.* (2016) es poco conservadora ya que se estima mayor en aproximadamente 30% para el CS y mayor en aproximadamente 20% para el CRFA, ambos comparados con los resultados obtenidos experimentalmente.

Como se mencionó anteriormente, el E_c calculado experimentalmente para el CS es muy parecido al calculado de acuerdo con las NTC Concreto (2017), siendo el experimental mayor sólo en 3% aproximadamente. Sin embargo, el E_c propuesto por Carrillo *et al.* (2016) para el CS es menor en aproximadamente 45% comparado con el E_c experimental, y menor en aproximadamente 42% del E_c calculado con las NTC Concreto (2017).

Algo similar pasa con el E_c del CRFA. El propuesto por Carrillo *et al.* (2016) es aproximadamente menor en 30% con respecto al E_c experimental del CRFA. Si se compara el E_c experimental del CS con el E_c experimental del CRFA, éste último presenta una disminución del 20% aproximadamente. Y comparado con el E_c calculado con las NTC Concreto (2017), es menor en aproximadamente 18%.

Ahora, si se comparan los valores propuestos por Carrillo *et al.* (2016), se observa que el E_c del CRFA es menor en aproximadamente 0.1% comparado con el E_c del CS, pero es menor en aproximadamente 42% comparado con el E_c calculado con las NTC Concreto (2017).

Ensayos de vigas de CRFA

En la Figura 49 se muestran los resultados de los ensayos de las vigas de CRFA (en términos de esfuerzo – ductilidad de desplazamiento), así como los valores reportados por el proveedor de las fibras (Bekaert) y la propuesta de Carrillo *et al.* (2016).

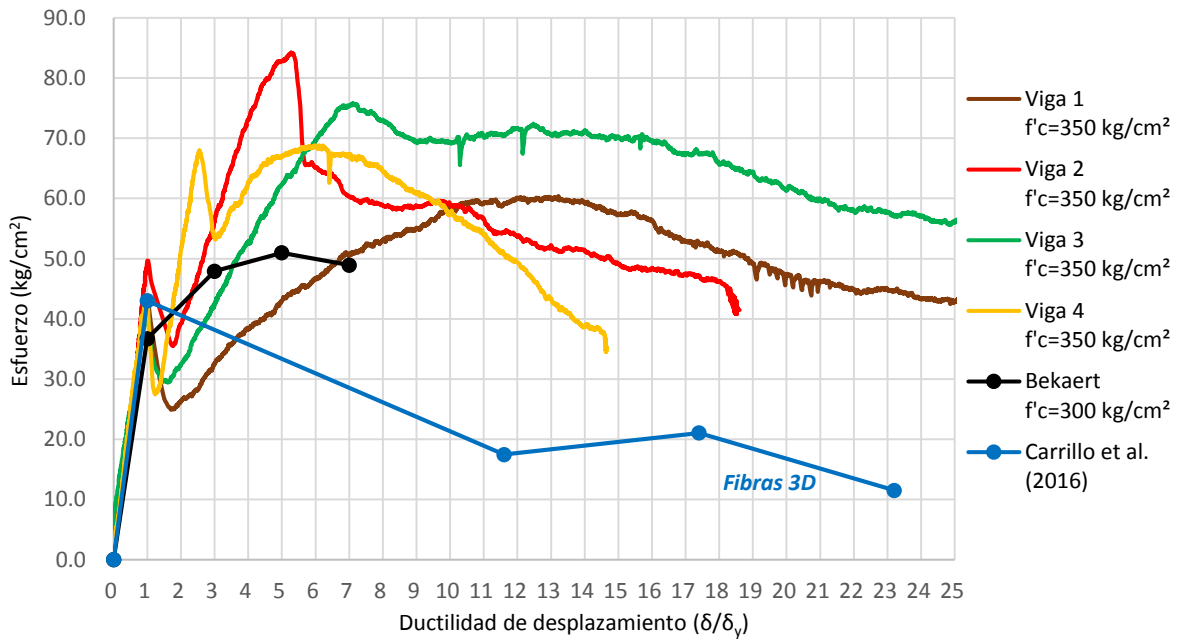


Figura 49. Curvas esfuerzo – ductilidad de desplazamiento; experimentales, teóricas y propuesta de Carrillo *et al.* (2016) para el CRFA

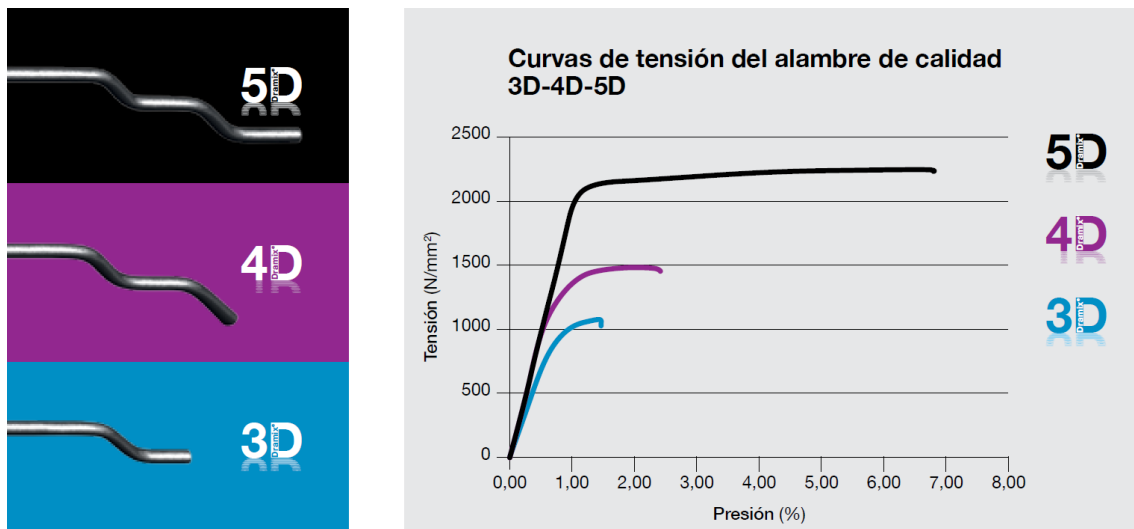


Figura 50. Comparación de fibras de series 3D, 4D y 5D (Bekaert, 2012)

Como se muestra en la Figura 49, la curva propuesta por Carrillo *et al.* (2016) está por debajo de las demás. Las diferencias en las comparaciones en los ensayos de cilindros y vigas de CRFA puede deberse a que Carrillo *et al.* (2016) utilizaron fibras Dramix de la actual serie 3D, mientras que las fibras usadas en el presente trabajo fueron de la serie 5D. La diferencia radica en que las fibras de la serie 5D tienen más dobleces en los ganchos extremos y su resistencia a la tensión es aproximadamente 70% mayor a la resistencia a tensión de las fibras de la serie 3D. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 50.

Especímenes ensayados

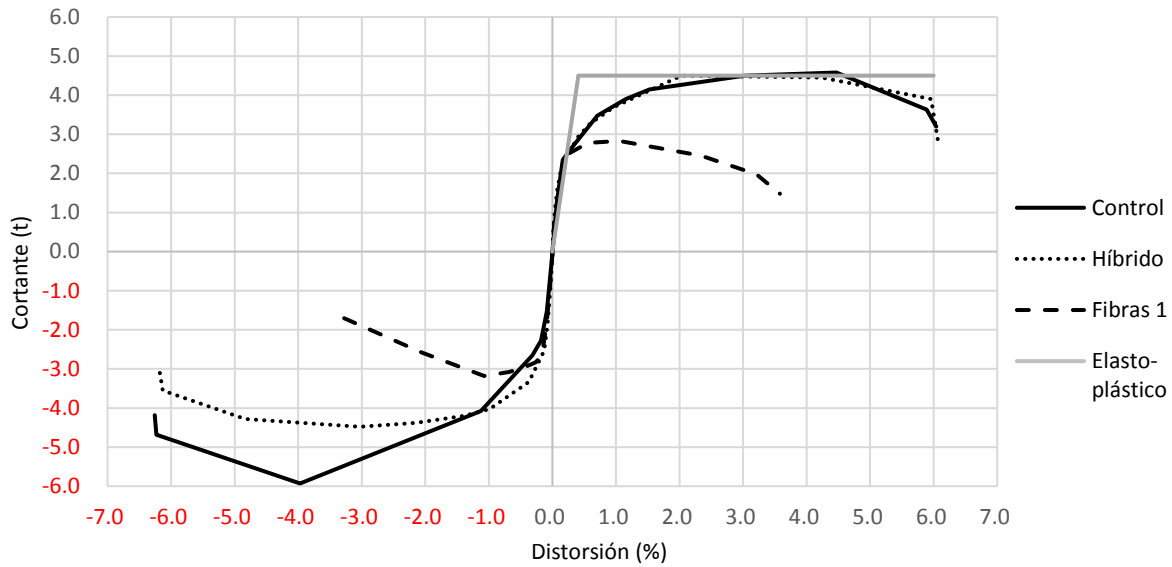


Figura 51. Envolventes del comportamiento histerético cortante – distorsión y modelo elasto-plástico

La Figura 51, muestra las envolventes de los diagramas de histéresis de los tres especímenes y un modelo elasto-plástico. El comportamiento de los especímenes *Control* e *Híbrido* son similares al modelo elasto-plástico. Se puede apreciar que el cortante máximo aplicado es de menos de 5 t en ciclos de empuje (positivos) y de menos de 6 t en ciclos en dirección contraria (negativos). Estos valores son bajos si se toma en cuenta que la resistencia del muro, según las NTC Concreto (2017), es de 55 t aproximadamente. Esto se debe, como ya se mencionó antes, a que los muros posiblemente se movieron como cuerpo rígido y no tomaron esfuerzos directamente. Lo anterior se sustenta también con el estado final de los muros, ya que no presentaron grieta alguna en ellos durante los ensayos. Esto ayudó a que se lograra la falla de los especímenes en la unión muro – losa (que era lo que se buscaba) y no en el muro.

Tabla 17. Degradación de resistencia en los especímenes

	Cortante máximo		Último ciclo		Degradación de resistencia (%)
	Cortante (t)	Distorsión (%)	Cortante (t)	Distorsión (%)	
Control	4.58	4.47	3.20	6.04	30
Híbrido	4.50	2.03	2.80	6.07	38
Fibras 1	2.83	1.05	1.48	3.58	48

En la Tabla 17 se presentan los valores de degradación de resistencia de los tres especímenes. Con respecto al espécimen *Control*, el espécimen *Híbrido* alcanzó casi la misma resistencia (sólo un 1.7% menor aproximadamente) en menos de la mitad de distorsión, sin embargo, la degradación de su rigidez fue del 8% más para el último ciclo correspondiente. El comportamiento del espécimen *Fibras 1* fue menor en 38% y en 76% aproximadamente, en resistencia y distorsión respectivamente en comparación con el espécimen *Control*. El espécimen *Fibras 1* fue el que presentó mayor degradación de resistencia durante la prueba.

Los tres especímenes se comportaron de manera similar hasta la distorsión de fluencia, que fue aproximadamente del 0.25% y corresponde con el reportado por Carrillo *et al.* (2012-2) para muros de CRFA. Esta distorsión de fluencia se refiere al cambio brusco de la pendiente elástica y no debe confundirse con la fluencia de las fibras de acero. El comportamiento siguió similar hasta una distorsión del 0.5% aproximadamente, donde el espécimen *Fibras 1* comenzó a presentar degradación de resistencia y no volvió a tener aumento de ésta. Los otros dos especímenes se comportaron de manera muy similar hasta el final de los ensayos.

Algunos trabajos, como los de Carrillo *et al.* (2012-1) y Arteta *et al.* (2017) reportan que los muros de CR presentan la resistencia a cortante a distorsiones aproximadas del 0.5%, y a distorsiones de más del 1% el daño en los muros es crítico, a tal grado del colapso. En las uniones ensayadas la resistencia máxima se presentó a 1% de distorsión o más. Incluso se observó incremento de resistencia a distorsiones de 2% (*Híbrido*) y 4% (*Control*).

El efecto observado en el registro del ancho de las grietas reveló que las fibras hicieron que en algunos casos las grietas se cerraran por completo en los semi-ciclos de carga correspondiente a esfuerzos compresivos.

El modo de falla en el espécimen *Control* fue con alta densidad de grietas distribuidas en la losa, en forma de *abanico* generándose desde los extremos del muro en la unión. En los extremos del muro se presentó aplastamiento y desconchamiento del concreto. En la Figura 52 se muestra el modo de falla del espécimen *Control*.

El modo de falla en el espécimen *Híbrido* fue con grietas distribuidas en la losa, en forma de *abanico* generándose desde los extremos del muro en la unión. En los últimos ciclos de carga, la falla se concentró en una grieta de gran espesor a lo largo de la losa, en forma perpendicular al muro y pasó en el extremo de la unión. En la Figura 53 se muestra el modo de falla del espécimen *Híbrido*.

La falla en el espécimen *Fibras 1* se concentró prácticamente sólo en una grieta de gran espesor, parecida a la presentada en el espécimen *Híbrido*. No se observó distribución de grietas como en los especímenes anteriores. En la Figura 54 se muestra el modo de falla del espécimen *Fibras 1*.

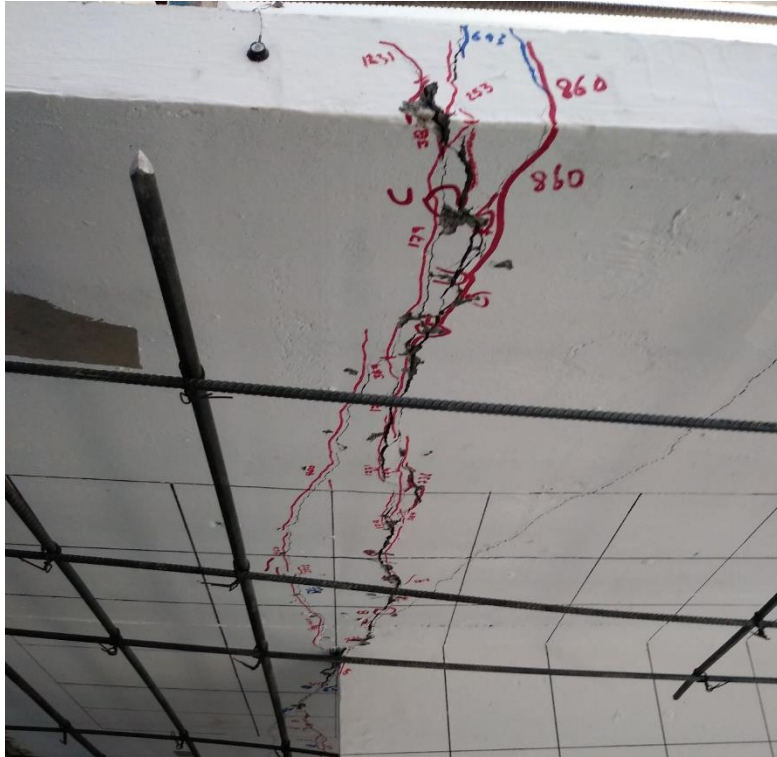


Figura 54. Modo de falla del espécimen Fibras 1 (Créditos: Héctor Guerrero)

Las diferencias en los modos de falla de los especímenes con los refuerzos de barras corrugadas y/o fibras corresponden a lo reportado por Carrillo *et al.* (2016). A medida que se reemplaza el refuerzo de barras corrugadas por fibras, la falla se concentra en una grieta de gran espesor en vez de en muchas grietas de espesores menores.

El patrón de agrietamiento de la losa del espécimen *Control* fue muy similar al reportado por Gómez *et al.* (2015). Aunque ellos estudiaron el efecto de muros sobre losas de transferencia, el esquema de prueba que utilizaron fue muy parecido al de los tres especímenes ensayados, por lo tanto, algunos resultados son comparables.

Con base en la Figura 51, la contribución de las fibras a la resistencia puede llegar a ser muy significativa si se combina con barras corrugadas. Aunque en el espécimen *Fibras 1* mostró un comportamiento inferior a los otros dos especímenes, es evidente que las fibras proveen resistencia a tensión por flexión tal y como lo reportan trabajos como el de Carrillo *et al.* (2013).

Observando el comportamiento mostrado en la Figura 32 y Figura 33, se puede esperar un mejor comportamiento con dosificaciones mayores de fibra (por ejemplo, el mínimo establecido por el ACI 318, 2014). Aunque la trabajabilidad del concreto disminuiría, posiblemente se pueda reducir aún más el refuerzo con barras corrugadas y obtener el mismo comportamiento que el espécimen *Control* o *Híbrido*, o posiblemente mejor.

6 CONCLUSIONES

Se ensayaron uniones muro – losa de concreto reforzado con fibras de acero, aplicando carga cíclica reversible de manera cuasi-estática controlada por desplazamientos. Se presentan los resultados de tres especímenes de un total de siete. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres. Se realizaron comparaciones en términos de resistencia y capacidad de deformación entre los tres especímenes y se discutieron con resultados obtenidos en investigaciones relacionadas. Se ofrecen las siguientes conclusiones.

- En las pruebas de cilindro de concreto reforzado con fibras, no se presentó una disminución significativa de la resistencia a compresión. Sin embargo, el módulo de elasticidad del concreto con fibras disminuyó 20% con respecto al del concreto simple.
- Los resultados de vigas ensayadas son dispersos, tanto en esfuerzos (CV = 12.16%) como en ductilidad de desplazamientos. Lo anterior puede deberse a que la distribución de las fibras en el concreto no siempre es perfectamente homogénea. Además, en algunos casos quedan fibras sin despegarse entre ellas, quedando paquetes de tres o hasta cuatro fibras pegadas.
- Para los ensayos de los especímenes, el comportamiento en el rango elástico de la unión (aproximadamente 0.25% de distorsión de entrepiso) es muy parecido, sin importar el tipo de refuerzo del espécimen.
- Las uniones de concreto con fibras presentaron capacidades de deformación de hasta 1% de distorsión de entrepiso sin daño significativo, lo que lleva a inferir que cuentan con una gran capacidad de deformación. Comparando estas capacidades con aquellas en muros (en donde se observan grandes niveles de daño apenas a distorsiones de entrepiso de 1%, incluso pudiendo existir colapso) se puede inferir que es más probable que falle primero un muro antes que su unión con la losa.
- A medida que se sustituye el refuerzo a base de barras corrugadas por refuerzo con fibras de acero, el modo de falla cambia de aplastamiento y desconchamiento de concreto con alta distribución de grietas, a una falla concentrada en una grieta de gran espesor.
- El uso de fibras ayuda a que las grietas se cierren en semi-ciclos de carga correspondiente a esfuerzos compresivos. Además, en la superficie de concreto, se evita el desconchamiento, formándose *escamas*.
- Una vez definida la trayectoria de falla sobre la losa, las deformaciones se concentraron en rotaciones plásticas bien definidas.
- Se necesita completar el programa experimental de los siete especímenes variando dosificación de fibras, proceso constructivo y carga aplicada sobre la losa (inducir la falla por cortante) para poder emitir recomendaciones y/o métodos de diseño para uniones muro – losa de concreto reforzado con fibras de acero.
- Es importante desarrollar más trabajos de investigación para losas de concreto con fibras en sistemas de entrepiso para entender mejor su comportamiento.

7 REFERENCIAS

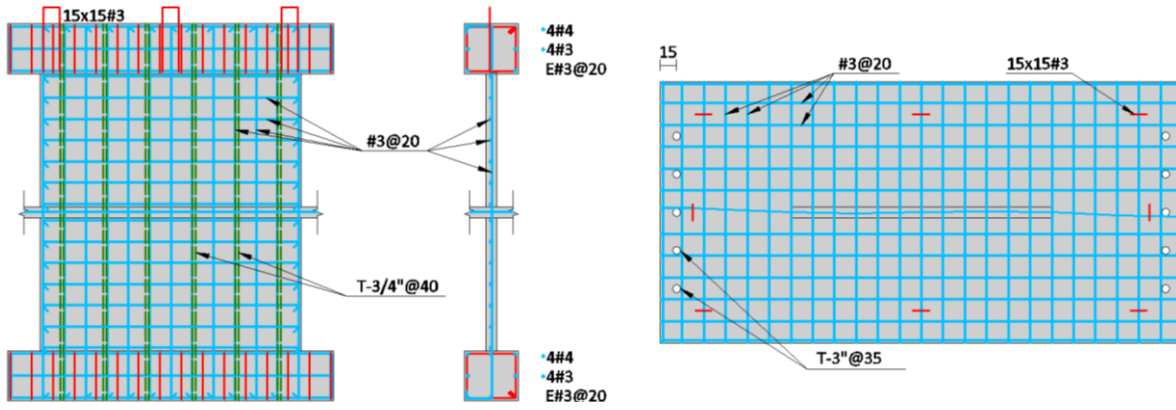
- Abdul Hamid N.H. y Masrom M.A. (2012), *Seismic Performance of Wall-Slab Joints in Industrialized Building System (IBS) Under Out-Of-Plane Reversible Cyclic Loading*, International Journal of Engineering and Technology, Malasia, pp. 26 y 32.
- ACI 318 (2014), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*, American Concrete Institute, Estados Unidos de América, pp. 146, 363 y 483–486.
- ACI 374 (2013), *Guide for testing reinforced concrete structural (ACI 374.2R-13)*, American Concrete Institute, Estados Unidos de América, pp. 10–11.
- Alvarado J. (2016), *Losas de concreto reforzado con fibras de acero para infraestructura minera*, Horizonte minero, pp. 38.
- Arteta C.A., Sánchez J., Daza R., Blandon C., Bonett R., Carrillo J. y Velez J. (2017), *Global and Local Demand Limits of Thin Reinforced Concrete Structural Wall Building Systems*, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, pp. 1 y 11.
- Athanasopoulou A. y Parra-Montesinos G. (2013), *Experimental Study on the Seismic Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Low-Rise Walls*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 767 y 777.
- Bach W. J. y Lao O. (2007), *Utilización de fibras metálicas para la construcción de concreto reforzado en la ciudad de Pucallpa*, Universidad Ricardo Palma – Facultad de ingeniería, Lima Perú, pp. 1–5 y 125–129.
- Bekaert (2012), *Dramix Reinforcing the future*, Bekaert, Bélgica, pp 7–8 y 18.
- Bekaert (2017), *Technical Data Sheet Dramix 5D 65/60BG*, Bekaert, México, pp. 1.
- Brunesi E., Peloso S., Pinho R. y Nascimbene R. (2017), *Cyclic testing and analysis of a full-scale cast-in-place reinforced concrete wall-slab-wall structure*, The European Association for Earthquake Engineering, pp. 1, 2, 34 y 35.
- Carrillo J. y Alcocer S. (2012-1), *Seismic performance of concrete walls for housing subjected to shaking table excitations*, Elsevier Engineering Structures, México, pp. 98 y 107.
- Carrillo J., Alcocer S. y Pincheira J. (2012-2), *Shaking Table Test of Steel Fiber Reinforced Concrete Walls for Housing*, 15 WCEE, Lisboa, pp. 8–10.
- Carrillo J. y Alcocer S. (2016), *Muros de concreto reforzado con fibras de acero Desempeño sismo-resistente basado en ensayos en mesa vibratoria*, ECOE Ediciones, México, pp. 3, 127–133.
- Carrillo J., Aperador W. y González G. (2013), *Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero*, Ingeniería Investigación y Tecnología, México, pp. 435, 447 y 448.
- Chao S, Naaman A. E. y Parra-Montesinos G. (2009), *Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 897 y 906.
- CEMEX (2018), *Cemento CPC 40*, Cementos Mexicanos S.A., México, pp. 1–3.
- ETABS (2016), *Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems*, Computers & Structures Inc., California Estados Unidos de América.

-
- Fernández M. (1999), *Hormigones reforzados con fibras de acero*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, pp. 14–16.
 - Filiatrault A., Pineau S. y Houde J. (1995), *Seismic behavior of Steel – fiber reinforced concrete interior beam – column joints*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 543, 550 y 551.
 - Gallo L., González G. y Carrillo J. (2013), *Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión*, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, pp. 117 y 131.
 - Gómez A., Manzanares D. A. y Juárez H. (2013), *Interaction between shear walls and transfer-slabs, subjected to lateral and vertical loading*, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Viena Austria, pp. 1, 4 y 9.
 - Gómez A., Manzanares D. A., Vargas O., Arellano E., Juárez H. y González O. (2015), *Estudio experimental y numérico de un prototipo losa-muro de transferencia*, Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, México, pp. 30, 31 y 45.
 - Guerrero H. (2017), *Propuesta de ensaye de conexiones muro losa de concreto reforzado con fibras de acero*, Instituto de Ingeniería UNAM, México, pp. 2 y 3.
 - Hashim M. S. Abdul-Wahab (1992), *Strength of Vertical Joints with Steel Fiber Reinforced Concrete in Large Panel Structures*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 367, 373 y 374.
 - Helmink H. y Schibley J. (2010), *Pisos de concreto reforzado con fibras de acero*, American Concrete Institute, México, pp. 26.
 - Henagar C.H. (1977), *Steel fibrous, Ductile concrete joint for seismic – resistant structures*, American Concrete Institute. Publicación SP-53, Estados Unidos de América, pp. 371–386.
 - López J. (2015), *Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: Influencia del tipo y consumo de fibra adicionado*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, pp. 1, 114–116.
 - Mármol P. (2010), *Hormigones con fibras de acero Características mecánicas*, Universidad Politécnica de Madrid, España, pp. 7, 76 y 77.
 - MOC CFE Sismo (2015), *Manual de diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo*, Comisión Federal de Electricidad, México, pp. 15–98.
 - Mohamed K. I., Basem H. A. y Assem A.A. H., *Effect of fiber type on the behavior of cementitious composite beam-column joints under reversed cyclic loading*, Faculty of Engineering and Applied Science, Canada, pp 969 y 972–976.
 - Mohd Asha'ari Masrom, Mohd Elfie Mohamad, Nor Hayati Abdul Hamid y Amer Yusuff (2017), *Experimental Study on Lateral Strength of Wall – Slab Joint Subjected to Lateral Cyclic Load*, International Conference of Global Network for Innovative Technology and AWAM International Conference in Civil Engineering, Malasia, pp. 1, 2, 7 y 8.
 - Naaman A. E., Likhitrungsilp V. y Parra-Montesinos G. (2007), *Punching Shear Response of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Slabs*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 170 y 178.

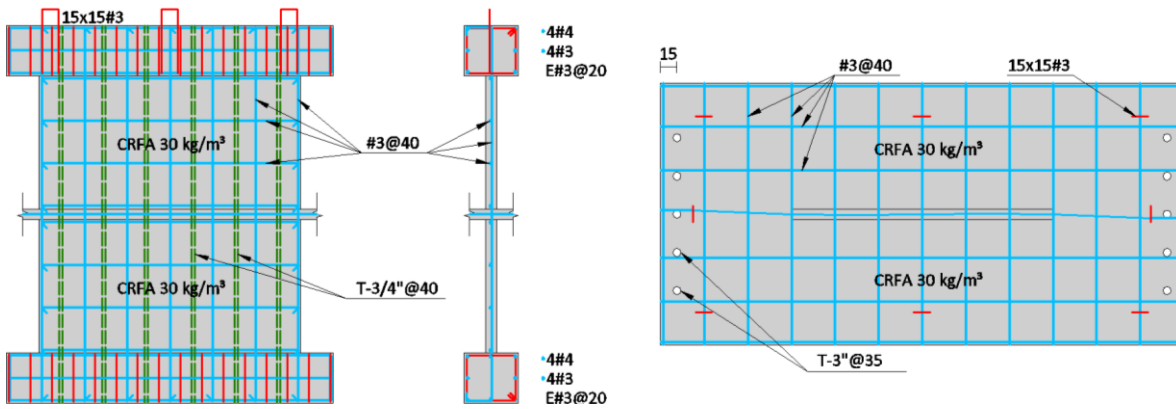
- Nakin S., Salam W. y Ahmed A. (2018), *Evaluation of Elastic Modulus of Fiber – Reinforced Concrete*, American Concrete Institute. Materials Journal, Estados Unidos de América, pp, 239 y 248.
- NMX-C-488 (2014), *Norma Mexicana: Fibras de acero para refuerzo de concreto – Especificaciones y métodos de ensayo*, ONNCCE S.C., México, pp. 21–29.
- NTC Concreto (2004), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*, Gaceta oficial del Distrito Federal, México, pp. 103.
- NTC Concreto (2017), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*, Gaceta oficial de la Ciudad de México, México, pp. 446–450.
- NTC Criterios (2017), *Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*, Gaceta oficial de la Ciudad de México, México, pp. 691–696.
- Park R. y Paulay T. (2016), *Estructuras de Concreto Reforzado*, LIMUSA, Christchurch Nueva Zelanda, pp. 210–223.
- Priestley M. J. N., Calvi G. M. y Kowalsky M. J. (2007), *Displacement – Based Seismic Design of Structures*, IUSS PRESS, Pravia Italia, pp. 173–183.
- Ramey M.R. (1984), *Fiber reinforced concrete for seismic joints*, Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco EUA, pp. 813 y 817.
- San Bartolomé A. y Ríos R. (2013), *Comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero*, Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, Perú, pp. 2, 14 y 15.
- Somma G. (2008), *Shear strength of fiber reinforced concrete beam – column joints under seismic loading*, 14^º Conferencia mundial en ingeniería sísmica, Beijing China, pp. 7.
- Wood S. L. (1990), *Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls*, American Concrete Institute. Structural Journal, Estados Unidos de América, pp. 99–107.

8 APÉNDICES

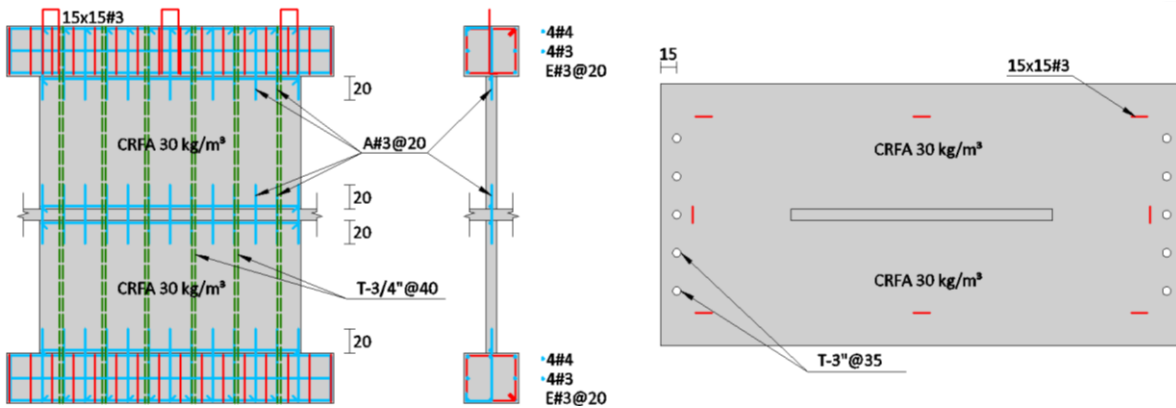
Apéndice A. Detalles de armados



Detalles de armado de espécimen Control (dimensiones en cm)



Detalles de armado de espécimen Híbrido (dimensiones en cm)



Detalles de armado de espécimen Fibras 1 (dimensiones en cm)

Apéndice B. Numeración y características de la instrumentación

Canales TDS

No. de serie: C080862129

Canal No.	Coficiente	Punto decimal	Unidad	Nombre	No. de serie	Descripción	Modo
[000]	5	2	tf	F1	---	Gato 100 t superior	6
[001]	5	2	tf	F2	---	Gato 100 t inferior	6
[002]	1	2	mm	H3	561648	Horizontal 3 (LVDT 100 ±50)	6
[003]	1	2	mm	H4	509541	Horizontal 4 (LVDT 100 ±50)	6
[010]	1	2	mm	D34	360341	Diagonal 34 (Micrómetro)	6
[011]	1	2	mm	D35	309177	Diagonal 35 (Micrómetro)	6
[012]	1	2	mm	D36	360338	Diagonal 36 (Micrómetro)	6
[013]	1	2	mm	D37	309151	Diagonal 37 (Micrómetro)	6
[014]	1	2	mm	D38	367874	Diagonal 38 (Micrómetro)	6
[015]	1	2	mm	D39	309146	Diagonal 39 (Micrómetro)	6
[016]	1	2	mm	D40	360340	Diagonal 40 (Micrómetro)	6
[017]	1	2	mm	D41	360339	Diagonal 41 (Micrómetro)	6
[020]	5	3	mm	V15	516307	Vertical 15 (LVDT 50 ±25)	6
[021]	2	3	mm	V16	522809	Vertical 16 (LVDT 25 ±12.5)	6
[022]	5	3	mm	V17	516309	Vertical 17 (LVDT 50 ±25)	6
[023]	5	3	mm	V18	516291	Vertical 18 (LVDT 50 ±25)	6
[024]	5	3	mm	V19	516308	Vertical 19 (LVDT 50 ±25)	6
[025]	2	3	mm	V20	521035	Vertical 20 (LVDT 25 ±12.5)	6
[026]	2	3	mm	V21	521038	Vertical 21 (LVDT 25 ±12.5)	6
[027]	2	3	mm	V22	520825	Vertical 22 (LVDT 25 ±12.5)	6
[028]	2	3	mm	V23	521037	Vertical 23 (LVDT 25 ±12.5)	6
[029]	2	3	mm	V24	521219	Vertical 24 (LVDT 25 ±12.5)	6
[030]	2	3	mm	V25	521228	Vertical 25 (LVDT 25 ±12.5)	6
[031]	2	3	mm	V26	521220	Vertical 26 (LVDT 25 ±12.5)	6
[032]	2	3	mm	V27	521227	Vertical 27 (LVDT 25 ±12.5)	6
[033]	2	3	mm	V28	521223	Vertical 28 (LVDT 25 ±12.5)	6
[034]	5	3	mm	V29	516303	Vertical 29 (LVDT 50 ±25)	6
[035]	5	3	mm	V30	516293	Vertical 30 (LVDT 50 ±25)	6
[036]	5	3	mm	V31	512023	Vertical 31 (LVDT 50 ±25)	6
[037]	2	3	mm	V32	521222	Vertical 32 (LVDT 25 ±12.5)	6
[038]	2	3	mm	V33	521040	Vertical 33 (LVDT 25 ±12.5)	6
[040]	5	3	mm	H5	516310	Horizontal 5 (LVDT 50 ±25)	6
[041]	5	3	mm	H6	516294	Horizontal 6 (LVDT 50 ±25)	6
[042]	5	3	mm	H7	516296	Horizontal 7 (LVDT 50 ±25)	6
[043]	5	3	mm	H8	512021	Horizontal 8 (LVDT 50 ±25)	6
[044]	5	3	mm	H9	516302	Horizontal 9 (LVDT 50 ±25)	6
[045]	5	3	mm	H10	516298	Horizontal 10 (LVDT 50 ±25)	6
[046]	5	3	mm	H11	516304	Horizontal 11 (LVDT 50 ±25)	6
[047]	5	3	mm	H12	516295	Horizontal 12 (LVDT 50 ±25)	6
[048]	5	3	mm	H13	510378	Horizontal 13 (LVDT 50 ±25)	6
[049]	5	3	mm	H14	510380	Horizontal 14 (LVDT 50 ±25)	6

Apéndice C. Bitácoras de ensayo

Bitácora de ensayo		Especimen 1: CONTROL						
Ciclo	Desplazamiento	Carga	Registro (grietas en mm)				Observaciones	
	mm	t						
1	-1.588	-0.950	6/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:		F2 empuja, está en compresión. Aparecen grietas menores en sentido de gatos. Ambos gatos empujaban, se invierten mangueras del gato F2
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:		
			50	Grieta C:		Grieta F:		
	+1.588	+1.350	6/4/18	Grieta A:	0.60	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.20	Grieta E:		
			141	Grieta C:		Grieta F:		
2	-1.588	-1.300	6/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:		
			198	Grieta C:		Grieta F:		
	+1.588	+1.400	6/4/18	Grieta A:	0.60	Grieta D:	0.40	
			Paso:	Grieta B:	0.25	Grieta E:		
			239	Grieta C:	0.45	Grieta F:		
3	-3.725	-2.250	6/4/18	Grieta A:	0.30	Grieta D:	0.35	
			Paso:	Grieta B:	0.80	Grieta E:	0.30	
			294	Grieta C:	0.25	Grieta F:		
	+3.725	+2.200	6/4/18	Grieta A:	1.00	Grieta D:	0.40	
			Paso:	Grieta B:	0.25	Grieta E:	0.15	
			354	Grieta C:	0.35	Grieta F:		
4	-3.725	-2.450	6/4/18	Grieta A:	0.35	Grieta D:	0.30	
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:	0.30	
			427	Grieta C:	0.25	Grieta F:		
	+3.725	+2.100	6/4/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:	0.40	
			Paso:	Grieta B:	0.25	Grieta E:	0.15	
			479	Grieta C:	0.30	Grieta F:		
5	-1.588	-1.200	6/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Aparece grieta en unión del muro con cabezal inferior
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			533	Grieta C:		Grieta F:		
	+1.588	+1.100	6/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			564	Grieta C:		Grieta F:		
6	-6.350	-2.800	6/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.35	Se agrietó el muro inferior de forma vertical
			Paso:	Grieta B:	0.80	Grieta E:	0.35	
			622	Grieta C:	0.25	Grieta F:		
	+6.350	+2.550	6/4/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:	0.40	Se revisa el transductor H3 (cabezal superior)
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:	0.15	
			688	Grieta C:	0.40	Grieta F:		
7	-6.350	-2.900	6/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.40	
			Paso:	Grieta B:	0.80	Grieta E:	0.50	
			786	Grieta C:	0.30	Grieta F:		
	+6.350	+2.500	6/4/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:	0.01	
			868	Grieta C:	0.60	Grieta F:	1.00	
8	-3.175	-1.250	9/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Se rigidizó el transductor del cabezal superior. Se instalaron las cámaras de led
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			917	Grieta C:		Grieta F:		
	+3.175	+1.600	9/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			953	Grieta C:		Grieta F:		

8 APÉNDICES

9	-12.700	-3.250	9/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.25		
			Paso:	Grieta B:	2.00	Grieta E:	0.80		
			995	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.15		
	+12.700	+3.550	9/4/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:	0.80		
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:	0.05		
			1046	Grieta C:	0.80	Grieta F:	2.00		
10	-12.700	-3.050	9/4/18	Grieta A:	0.10	Grieta D:	0.30		
			Paso:	Grieta B:	2.00	Grieta E:	1.00		
			1081	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.35		
	+12.700	+3.450	9/4/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:	0.80		Se dejó la prueba en fuerza igual a cero en el paso 1152
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:	0.05		
			117	Grieta C:	0.70	Grieta F:	2.00		
11	-6.350	-1.600	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1188	Grieta C:		Grieta F:			
	+6.350	+1.650	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1227	Grieta C:		Grieta F:			
12	-19.050	-3.750	10/4/18	Grieta A:	0.10	Grieta D:	0.30	Antes de éste ciclo se reacomodó el transductor H3 con -30.38 mm. Se reseteó todo a cero	
			Paso:	Grieta B:	2.50	Grieta E:	0.60		
			1305	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.20		
	+19.050	+4.200	10/4/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:	0.80		
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:	0.10		
			1359	Grieta C:	1.00	Grieta F:	2.50		
13	-19.050	-3.650	10/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.10		
			Paso:	Grieta B:	3.00	Grieta E:	0.60		
			1434	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.15		
	+19.050	+3.850	10/4/18	Grieta A:	1.00	Grieta D:	0.60		
			Paso:	Grieta B:	0.20	Grieta E:	0.10		
			1519	Grieta C:	0.80	Grieta F:	2.50		
14	-9.525	-1.950	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1606	Grieta C:		Grieta F:			
	+9.525	+1.750	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1637	Grieta C:		Grieta F:			
15	-25.400	-3.950	10/4/18	Grieta A:	0.35	Grieta D:	0.15		
			Paso:	Grieta B:	4.00	Grieta E:	0.60		
			1707	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.20		
	+25.400	+4.250	10/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	0.60		
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:	0.10		
			1757	Grieta C:	1.00	Grieta F:	2.50		
16	-25.400	-3.650	10/4/18	Grieta A:	0.35	Grieta D:	0.10	El transductor H4 se inclinó. Se acomodaron transductores 18, 21, 20, 19 y 14	
			Paso:	Grieta B:	6.00	Grieta E:	0.80		
			1803	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.25		
	+25.400	+2.900	10/4/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:	0.60		
			Paso:	Grieta B:	0.35	Grieta E:	0.15		
			1838	Grieta C:	1.00	Grieta F:	3.00		
17	-12.700	-1.500	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1861	Grieta C:		Grieta F:			
	+12.700	+0.950	10/4/18	Grieta A:		Grieta D:			Se ajustó el transductor H4 en cero y se cambió el acrílico a horizontal
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1872	Grieta C:		Grieta F:			

8 APÉNDICES

18	-38.100	-3.850	11/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.15	Antes de comenzar la prueba se ajustó el transductor H3 a cero y se cambió el acrílico a horizontal
			Paso:	Grieta B:	6.00	Grieta E:	1.00	
			1971	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.30	
	+38.100	+4.500	11/4/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	1.00	Al final del ciclo se enderezó el perfil que sostiene los transductores del muro inferior. Se quitó transductor H5
			Paso:	Grieta B:	0.35	Grieta E:	0.10	
			2080	Grieta C:	1.50	Grieta F:	3.00	
19	-38.100	-3.500	11/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.15	
			Paso:	Grieta B:	6.00	Grieta E:	0.80	
			2140	Grieta C:	0.10	Grieta F:	0.30	
	+38.100	+4.350	11/4/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	0.35	Grieta E:	0.30	
			2216	Grieta C:	1.25	Grieta F:	3.00	
20	-19.050	-1.550	11/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2279	Grieta C:		Grieta F:		
	+19.050	+1.600	11/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Al final se quitaron los leds de la cámara. Se quitaron transductores V16 y H6
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2313	Grieta C:		Grieta F:		
21	-50.800	-4.250	11/4/18	Grieta A:	0.30	Grieta D:	0.10	Al final del ciclo se cambiaron transductores V12 y V13. Se duplicó la capacidad de H3 y H4
			Paso:	Grieta B:	8.00	Grieta E:	3.00	
			2389	Grieta C:	0.15	Grieta F:	0.30	
	+50.800	+5.200	11/4/18	Grieta A:	4.00	Grieta D:	1.00	En paso 2560 se acomodó transductor H8
			Paso:	Grieta B:	0.40	Grieta E:	0.40	
			2520	Grieta C:	2.00	Grieta F:	3.00	
22	-50.800	-3.250	11/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:	0.15	Se desacomodó transductor H8. En paso 2639 hubo desconchamiento
			Paso:	Grieta B:	9.00	Grieta E:	1.25	
			2594	Grieta C:	0.35	Grieta F:	0.50	
	+50.800	+4.950	11/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	0.20	Grieta E:	0.35	
			2672	Grieta C:	2.00	Grieta F:	5.00	
23	-25.400	-1.250	11/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2740	Grieta C:		Grieta F:		
	+25.400	+1.600	11/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2778	Grieta C:		Grieta F:		
24	-76.200	-4.000	12/4/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:	0.15	Antes del ciclo se quita instrumentación, sólo se dejó H3, H4 y micrómetros
			Paso:	Grieta B:	10.00	Grieta E:	4.00	
			2900	Grieta C:	0.20	Grieta F:	3.00	
	+76.200	+4.800	12/4/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:	1.00	Grieta F no se puede medir, hubo desconchamiento
			Paso:	Grieta B:	0.25	Grieta E:	0.35	
			3002	Grieta C:	3.00	Grieta F:		
25	-76.200	-3.300	12/4/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:	0.30	
			Paso:	Grieta B:	9.00	Grieta E:	3.00	
			3077	Grieta C:	0.60	Grieta F:		
	+76.200	+4.250	12/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	1.00	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:	0.60	
			3166	Grieta C:	2.50	Grieta F:		
26	-38.100	-0.500	12/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			3207	Grieta C:		Grieta F:		
	+38.100	+1.550	12/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			3232	Grieta C:		Grieta F:		

8 APÉNDICES

Bitácora de ensayo **Espécimen 2: HÍBRIDO**

Ciclo	Desplazamiento	Carga	Registro (grietas en mm)						Observaciones
	mm	t							
1	-0.790	-1.000	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Antes de empezar, se cambió transductor H11	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			51	Grieta C:		Grieta F:			
	+0.790	+1.050	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			73	Grieta C:		Grieta F:			
2	-0.790	-1.000	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			95	Grieta C:		Grieta F:			
	+0.790	+1.000	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			115	Grieta C:		Grieta F:			
3	-1.588	-1.500	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			144	Grieta C:		Grieta F:			
	+1.588	+1.800	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			175	Grieta C:		Grieta F:			
4	-1.588	-1.500	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			196	Grieta C:		Grieta F:			
	+1.588	+1.700	19/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			221	Grieta C:		Grieta F:			
5	-3.175	-1.850	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Se instalaron las cámaras de led	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			274	Grieta C:		Grieta F:			
	+3.175	+2.600	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			318	Grieta C:		Grieta F:			
6	-3.175	-1.600	23/4/18	Grieta A:	0.10	Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			345	Grieta C:		Grieta F:			
	+3.175	+1.750	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			376	Grieta C:		Grieta F:			
7	-1.588	-0.850	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			413	Grieta C:		Grieta F:			
	+1.588	+1.250	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			429	Grieta C:		Grieta F:			

8 APÉNDICES

8	-4.763	-1.950	23/4/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			456	Grieta C:		Grieta F:		
	+4.763	+2.500	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			483	Grieta C:		Grieta F:		
9	-4.763	-1.850	23/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			508	Grieta C:	0.20	Grieta F:		
	+4.763	+2.300	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			529	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
10	-2.382	-0.650	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			549	Grieta C:		Grieta F:		
	+2.382	+1.150	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			559	Grieta C:		Grieta F:		
11	-6.350	-2.150	23/4/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			588	Grieta C:	0.30	Grieta F:		
	+6.350	+2.750	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.20	Grieta E:		
			616	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
12	-6.350	-2.100	23/4/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			640	Grieta C:	0.30	Grieta F:		
	+6.350	+2.650	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	0.25	
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			661	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
13	-3.175	-0.750	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			678	Grieta C:		Grieta F:		
	+3.175	+1.200	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			698	Grieta C:		Grieta F:		
14	-9.525	-2.800	23/4/18	Grieta A:	0.30	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			725	Grieta C:	0.35	Grieta F:		
	+9.525	+3.350	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	0.40	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:		
			768	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
15	-9.525	-2.550	23/4/18	Grieta A:	0.45	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			797	Grieta C:	0.40	Grieta F:		
	+9.525	+3.200	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	0.30	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:		
			822	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		

8 APÉNDICES

16	-4.763	-0.950	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			848	Grieta C:		Grieta F:		
	+4.763	+1.350	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			864	Grieta C:		Grieta F:		
17	-12.700	-3.000	23/4/18	Grieta A:	0.55	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			894	Grieta C:	0.50	Grieta F:		
	+12.700	+3.650	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	0.50	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:		
			922	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
18	-12.700	-1.900	23/4/18	Grieta A:	0.40	Grieta D:	0.01	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:		
			952	Grieta C:	0.60	Grieta F:		
	+12.700	+3.500	23/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	0.50	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:	0.50	
			984	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
19	-6.350	-0.900	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1040	Grieta C:		Grieta F:		
	+6.350	+1.300	23/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1059	Grieta C:		Grieta F:		
20	-19.050	-3.600	24/4/18	Grieta A:	0.60	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1125	Grieta C:	1.00	Grieta F:		
	+19.050	+4.050	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	1.50	Hubo desconchamiento en esquina izquierda
			Paso:	Grieta B:	0.35	Grieta E:	0.80	
			1186	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
21	-19.050	-3.150	24/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:	0.10	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1256	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+19.050	+3.800	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	1.50	
			Paso:	Grieta B:	0.40	Grieta E:	1.00	
			1307	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
22	-9.525	-1.050	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1356	Grieta C:		Grieta F:		
	+9.525	+1.400	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		Se dejó en carga cero y se quitaron transductores V16, V32 y V33
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1387	Grieta C:		Grieta F:		
23	-25.400	-3.700	24/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1447	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+25.400	+4.250	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	2.00	
			Paso:	Grieta B:	0.50	Grieta E:	1.25	
			1490	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		

8 APÉNDICES

24	-25.400	-3.450	24/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1543	Grieta C:	1.50	Grieta F:		
	+25.400	+4.000	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	1.50	
			Paso:	Grieta B:	0.40	Grieta E:	1.25	
			1598	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
25	-12.700	-1.650	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1633	Grieta C:		Grieta F:		
	+12.700	+1.500	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1656	Grieta C:		Grieta F:		
26	-38.100	-4.300	24/4/18	Grieta A:	0.60	Grieta D:	0.10	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1698	Grieta C:	2.00	Grieta F:		
	+38.100	+4.400	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	3.00	
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:	1.70	
			1766	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:		
27	-38.100	-3.700	24/4/18	Grieta A:	0.40	Grieta D:	Se cerró	Se desconcha vecindad de grieta D
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			1838	Grieta C:	2.00	Grieta F:	2.00	
	+38.100	+4.200	24/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	10.00	
			Paso:	Grieta B:	0.80	Grieta E:	2.00	
			1882	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:	Se cerró	
28	-19.050	-1.200	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1931	Grieta C:		Grieta F:		
	+19.050	+1.550	24/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1961	Grieta C:		Grieta F:		
29	-50.800	-4.300	25/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	Se cerró	Antes de empezar, se quitaron transductores chicos, H5 y H14
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	Se cerró	
			2021	Grieta C:	2.50	Grieta F:	2.00	
	+50.800	+4.400	25/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	13.00	
			Paso:	Grieta B:	1.00	Grieta E:	4.00	
			2092	Grieta C:	Se cerró	Grieta F:	Se cerró	
30	-50.800	-3.800	25/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	0.10	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	0.35	
			2146	Grieta C:	6.00	Grieta F:	3.00	
	+50.800	+4.150	25/4/18	Grieta A:	0.10	Grieta D:	13.00	
			Paso:	Grieta B:	0.80	Grieta E:	13.00	
			2192	Grieta C:	0.15	Grieta F:	0.10	
31	-25.400	-1.200	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2223	Grieta C:		Grieta F:		
	+25.400	+1.450	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2258	Grieta C:		Grieta F:		

8 APÉNDICES

32	-76.200	-4.350	25/4/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:	0.01	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	0.01	
			2319	Grieta C:	6.00	Grieta F:	5.00	
	+76.200	+4.350	25/4/18	Grieta A:	0.50	Grieta D:	8.00	
			Paso:	Grieta B:	0.50	Grieta E:	11.00	
			2395	Grieta C:	0.35	Grieta F:	0.20	
33	-76.200	-3.350	25/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	0.60	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	1.00	
			2488	Grieta C:	30.00	Grieta F:	6.00	
	+76.200	+3.800	25/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	8.00	
			Paso:	Grieta B:	0.35	Grieta E:	15.00	
			2536	Grieta C:	0.80	Grieta F:	0.35	
34	-38.100	-1.050	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2507	Grieta C:		Grieta F:		
	+38.100	+1.200	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2594	Grieta C:		Grieta F:		
35	-101.600	-3.550	25/4/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	0.35	En el paso 2703 se enderezó transductor H4
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	0.20	
			2664	Grieta C:	29.00	Grieta F:	10.00	
	+101.600	+3.400	25/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	31.00	
			Paso:	Grieta B:	0.20	Grieta E:	11.00	
			2750	Grieta C:	0.60	Grieta F:	1.25	
36	-101.600	-2.650	25/4/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	Se cerró	Grieta E:	3.00	
			2822	Grieta C:	20.00	Grieta F:	11.00	
	+101.600	+3.150	25/4/18	Grieta A:	Se cerró	Grieta D:	25.00	
			Paso:	Grieta B:	0.30	Grieta E:	8.50	
			2878	Grieta C:	0.50	Grieta F:	3.00	
37	-50.800	-0.800	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2959	Grieta C:		Grieta F:		
	+50.800	+1.200	25/4/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			2979	Grieta C:		Grieta F:		

8 APÉNDICES

Bitácora de ensayo Espécimen 3: FIBRAS 1

Ciclo	Desplazamiento	Carga	Registro (grietas en mm)				Observaciones
	mm	t					
1	-0.790	-0.200	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			9	Grieta C:		Grieta F:	
	+0.790	+1.100	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			29	Grieta C:		Grieta F:	
2	-0.790	-1.060	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			46	Grieta C:		Grieta F:	
	+0.790	+1.150	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			60	Grieta C:		Grieta F:	
3	-1.588	-0.700	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			81	Grieta C:		Grieta F:	
	+1.588	+1.700	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			108	Grieta C:		Grieta F:	
4	-1.588	-0.650	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			124	Grieta C:		Grieta F:	
	+1.588	+1.700	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			141	Grieta C:		Grieta F:	
5	-3.175	-1.550	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			179	Grieta C:		Grieta F:	
	+3.175	+2.350	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			220	Grieta C:		Grieta F:	
6	-3.175	-1.700	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			252	Grieta C:		Grieta F:	
	+3.175	+2.400	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			272	Grieta C:		Grieta F:	
7	-1.588	-0.150	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			285	Grieta C:		Grieta F:	
	+1.588	+1.700	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:	
			300	Grieta C:		Grieta F:	

8 APÉNDICES

8	-4.763	-2.600	15/5/18	Grieta A:	0.60	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			333	Grieta C:		Grieta F:		
	+4.763	+2.650	15/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			364	Grieta C:		Grieta F:		
9	-4.763	-2.400	15/5/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			384	Grieta C:		Grieta F:		
	+4.763	+2.500	15/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			409	Grieta C:		Grieta F:		
10	-2.382	-0.550	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			427	Grieta C:		Grieta F:		
	+2.382	+1.850	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			437	Grieta C:		Grieta F:		
11	-6.350	-2.550	15/5/18	Grieta A:	0.80	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			460	Grieta C:		Grieta F:		
	+6.350	+2.750	15/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			485	Grieta C:		Grieta F:		
12	-6.350	-2.500	15/5/18	Grieta A:	1.25	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:		
			502	Grieta C:		Grieta F:		
	+6.350	+2.700	15/5/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:		
			563	Grieta C:	0.10	Grieta F:		
13	-3.175	-1.100	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			586	Grieta C:		Grieta F:		
	+3.175	+1.850	15/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			601	Grieta C:		Grieta F:		
14	-9.525	-2.750	16/5/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:		
			651	Grieta C:	0.80	Grieta F:		
	+9.525	+2.900	16/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	0.05	Grieta E:		
			693	Grieta C:	0.05	Grieta F:		
15	-9.525	-2.600	16/5/18	Grieta A:	1.50	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	0.60	Grieta E:		
			736	Grieta C:	1.00	Grieta F:		
	+9.525	+2.750	16/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:	0.80	
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:		
			770	Grieta C:	0.10	Grieta F:		

8 APÉNDICES

16	-4.763	-1.300	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			802	Grieta C:		Grieta F:		
	+4.763	+1.850	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			824	Grieta C:		Grieta F:		
17	-12.700	-2.900	16/5/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	1.00	Grieta E:		
			860	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+12.700	+2.950	16/5/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:	1.25	
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:		
			899	Grieta C:	0.10	Grieta F:		
18	-12.700	-2.600	16/5/18	Grieta A:	2.50	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	1.00	Grieta E:		
			938	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+12.700	+2.900	16/5/18	Grieta A:	0.20	Grieta D:	1.25	
			Paso:	Grieta B:	0.10	Grieta E:		
			967	Grieta C:	0.10	Grieta F:		
19	-6.350	-1.150	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			990	Grieta C:		Grieta F:		
	+6.350	+1.700	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1009	Grieta C:		Grieta F:		
20	-19.050	-2.700	16/5/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	Se cerró	Se comienza a desconchar el concreto en la zona de daño
			Paso:	Grieta B:	1.25	Grieta E:		
			1042	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+19.050	+3.100	16/5/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:	2.00	
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			1074	Grieta C:	0.10	Grieta F:		
21	-19.050	-2.500	16/5/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	2.00	Grieta E:		
			1121	Grieta C:	1.25	Grieta F:		
	+19.050	+2.850	16/5/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:	1.50	
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			1153	Grieta C:	0.20	Grieta F:		
22	-9.525	-1.000	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1167	Grieta C:		Grieta F:		
	+9.525	+1.450	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:		
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:		
			1192	Grieta C:		Grieta F:		
23	-25.400	-2.650	16/5/18	Grieta A:	2.50	Grieta D:	Se cerró	
			Paso:	Grieta B:	1.50	Grieta E:		
			1231	Grieta C:	2.50	Grieta F:		
	+25.400	+2.900	16/5/18	Grieta A:	0.25	Grieta D:	2.50	
			Paso:	Grieta B:	0.15	Grieta E:		
			1271	Grieta C:	0.10	Grieta F:		

8 APÉNDICES

24	-25.400	-2.300	16/5/18	Grieta A:	2.00	Grieta D:	0.20		
			Paso:	Grieta B:	2.50	Grieta E:			
			1308	Grieta C:	2.80	Grieta F:			
	+25.400	+2.650	16/5/18	Grieta A:	0.15	Grieta D:	3.00		
			Paso:	Grieta B:	0.25	Grieta E:			
			1332	Grieta C:	0.25	Grieta F:			
25	-12.700	-0.850	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1348	Grieta C:		Grieta F:			
	+12.700	+1.300	16/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1367	Grieta C:		Grieta F:			
26	-38.100	-2.450	17/5/18	Grieta A:	4.00	Grieta D:	0.15	Antes de comenzar se quitan transductores 16, 20, 28 y 32. Se trozó el cable del led 17	
			Paso:	Grieta B:	-	Grieta E:			
			1445	Grieta C:	5.00	Grieta F:			
	+38.100	+2.400	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:	5.00	No se colocó letrero ni se miden grietas por seguridad	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1488	Grieta C:		Grieta F:			
27	-38.100	-1.900	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:		Antes de comenzar la repetición, se quitan transductores. Sólo se quedan H3 y H4	
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1546	Grieta C:		Grieta F:			
	+38.100	+2.100	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1592	Grieta C:		Grieta F:			
28	-19.050	-0.600	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1615	Grieta C:		Grieta F:			
	+19.050	+1.050	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1648	Grieta C:		Grieta F:			
29	-50.800	-1.950	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1725	Grieta C:		Grieta F:			
	+50.800	+1.850	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1790	Grieta C:		Grieta F:			
30	-50.800	-1.550	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1833	Grieta C:		Grieta F:			
	+50.800	+1.600	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1880	Grieta C:		Grieta F:			
31	-25.400	-0.350	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1903	Grieta C:		Grieta F:			
	+25.400	+0.850	17/5/18	Grieta A:		Grieta D:			
			Paso:	Grieta B:		Grieta E:			
			1922	Grieta C:		Grieta F:			

