



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Pruebas experimentales en conexiones
prefabricadas muro-losa de concreto
reforzado con fibras metálicas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Ricardo Patiño Carmona

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2020

Agradecimientos

A Dios, por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida y por todas las bendiciones recibidas.

A la UNAM, Facultad e Instituto de Ingeniería y al CENAPRED, por la formación recibida y la oportunidad de realizar las pruebas en sus instalaciones.

A mi tutor Héctor Guerrero Bobadilla por la confianza, paciencia, apoyo y conocimiento recibido en la realización de este proyecto

A CEMEX por la generosa donación de material que facilitó la realización de este proyecto.

A mis padres, tíos y hermanos, como gratitud por sus sacrificios, amor, apoyos y estímulos en mi vida.

A mi novia Judith, por su amor, paciencia y apoyo.

A mis amigos, colegas y compañeros, por los momentos, experiencias y trabajos compartidos.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos en pruebas experimentales de uniones muro-losas prefabricadas de concreto reforzado con fibras de acero (CRFA). Las pruebas consistieron en ensayar dos especímenes, variando la cantidad de refuerzo en las losas de cada uno de ellos.

Las losas prefabricadas del primer espécimen ensayado (Fibras) no contaban con refuerzo convencional (barras corrugadas), esto se hizo para tomarlo como referencia con fines de comparación con el segundo espécimen ensayado (Mixto) cuyas losas sí contaron con refuerzo de barras. La dosificación de fibras de acero en las uniones de ambos especímenes fue la misma, 70 kg/m^3 .

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras Grandes del *Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)*. En dichas pruebas se aplicó carga cíclica reversible en los especímenes de manera cuasi-estática y estuvieron controladas por desplazamiento hasta llegar a la falla. Los resultados se muestran como una comparación en términos de capacidad de deformación y resistencia de ambos especímenes.

ABSTRACT

Results of an experimental program of prefabricated wall-slab joints of steel fiber reinforced concrete are presented. To carry out such program tests of two specimens were conducted.

The first specimen (Fibers) had no conventional steel bar reinforcement and serves as a reference for comparison purposes with the second specimen (Hybrid), whose slabs were reinforced with steel bars. The same steel fiber dosage (70 kg/m^3) was used in both specimens.

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 which was displacement controlled until failure was reached. Comparisons in terms of strength and deformation capacity are presented.

Contenido

Introducción.....	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos	1
Organización de la tesis.....	2
1. Antecedentes.....	3
1.1 Las fibras como refuerzo del concreto	3
1.2 Concreto reforzado con fibra de acero (CRFA).....	7
1.3 Uniones muro –losa de CRFA	9
2. Descripción del experimento.....	10
2.1 Configuración y geometría	10
2.2 Materiales	15
2.3 Detalles de colado de las uniones de los especímenes.....	15
2.4 Instrumentación.....	18
2.5 Protocolo de carga	24
3. Resultados experimentales	25
3.1 Resistencia del concreto	25
3.2 Condiciones iniciales de los modelos.....	28
3.3 Curvas cortante-distorsión	28
3.4 Evolución de grietas marcadas	32
3.5 Daños visuales e inspección post-prueba.....	35
4. Conclusiones y recomendaciones.....	38
Referencias	39

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de las fibras adaptada de López (2015)	3
Figura 2. Ejemplos del empleo de CRF en obras de ingeniería.	4
Figura 3. Fibras usadas como refuerzo de concreto	6
Figura 4. Mecanismo de cosido de la grieta	8
Figura 5. Esquema de las pruebas.....	10
Figura 6. Esquema y ubicación de losas prefabricadas	11
Figura 7. Detalle de los anclajes de varilla	12
Figura 8. Vista frontal del espécimen (acot. en mm)	13
Figura 9. Vista superior del espécimen (acot. en mm)	13
Figura 10. Vista lateral (acot. en mm)	14
Figura 11. Montaje final del espécimen.....	14
Figura 12. Lotes de fibra para el colado	16
Figura 13. Lingotes sobre la losa	17
Figura 14. Ubicación de los puntales preventivos de madera	18
Figura 15. Instrumentación sobre la losa	19
Figura 16. Instrumentos en los cabezales.....	19
Figura 17. Transductores sobre la losa	20
Figura 18. Placa de confinamiento en el cabezal superior.	21
Figura 19. Detalle de la conexión del actuador inferior	22
Figura 20. Rodillo colocado bajo el espécimen	22
Figura 21. Historia de desplazamientos en LVDT H1	24
Figura 22. Pruebas de cilindros de concreto	26
Figura 23. Estado inicial de agrietamiento Modelo Mixto	28
Figura 24. Curvas de histéresis cortante-distorsión	30
Figura 25. Envoltentes de histéresis cortante-distorsión	30
Figura 26. Especímenes deformados en el nivel de desplazamiento máximo	31
Figura 27. Grietas en espécimen Fibras	33
Figura 28. Grietas en espécimen Mixto.....	34
Figura 29. Daño visual en el espécimen Fibras.....	35
Figura 30. Daño visual en el espécimen Mixto	35
Figura 31. Colocación del armado de la losa	36
Figura 32. Distribución aleatoria de las fibras en el concreto	36

Introducción

Planteamiento del problema

Dadas las características del territorio nacional, en una porción importante del mismo hay edificios que se encuentran sometidos a efectos sísmicos cuyas fuerzas provocan efectos que pueden poner en riesgo su integridad estructural.

Por ese motivo, se vuelve de gran interés estudiar alternativas de métodos constructivos, materiales y sistemas estructurales sismo-resistentes.

Dado el uso generalizado que se hace del concreto como material de construcción y teniendo en cuenta su baja resistencia a la tensión y al impacto; conviene considerar la adición de fibras al mismo, ya siendo complemento de las barras de acero tradicionales, ya como refuerzo por sí mismas como un método alternativo de subsanar dichas deficiencias e incluso mejorar algunas de las propiedades estructurales del concreto.

Por lo anterior y en el caso del presente trabajo, se estudió el comportamiento de uniones muro-losa de concreto reforzado con fibras ante cargas laterales para comprender y analizar su capacidad resistente y de deformación.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general analizar la capacidad de carga y de deformación de uniones muro-losa prefabricadas de concreto reforzado con fibra de acero (CRFA), sometidas a cargas cíclicas reversibles.

Los objetivos particulares son:

- Evaluar experimentalmente el efecto que tiene la adición de fibras de acero en uniones muro-losa prefabricadas.
- Comprender el comportamiento estructural de uniones muro-losa prefabricadas.
- Evaluar la factibilidad de usar elementos prefabricados de muros y losas como método alternativo de construcción.
- Promover el uso de sistemas y métodos constructivos innovadores en México.

Organización de la tesis

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción a los sistemas de concreto reforzado con fibras, así como una compilación de los trabajos en losas de CRFA para dar contexto y lugar a la investigación realizada.

En el capítulo 2 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 3 se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos de los especímenes. Además, se presentan los resultados de las pruebas que se realizaron a las muestras de materiales utilizados en la construcción de los especímenes.

En el capítulo 4 se ofrecen algunas de las conclusiones y recomendaciones obtenidas con base en el presente trabajo de investigación

1. Antecedentes

1.1 Las fibras como refuerzo del concreto

El concreto reforzado con fibras (CRF) es un material que asocia una matriz (concreto) y un refuerzo (fibra). A diferencia de los armados tradicionales las fibras se distribuyen más o menos uniformemente en la masa del concreto con orientaciones normalmente aleatorias, y constituyen un material con comportamiento homogéneo (López, 2015).

La efectividad del refuerzo que proporciona la fibra depende de muchos factores, pero especialmente del tipo de fibra, de su anclaje, resistencia a tensión y su módulo de elasticidad.

A diferencia del concreto reforzado convencional, en el CRF las propiedades mecánicas tienen más bien un carácter isótropo, que no depende de la orientación y concentración del refuerzo en una zona determinada (Fernández, 1999).

Cada tipo de fibra tiene una influencia particular sobre dichas propiedades, la elección del tipo de fibras es, por tanto, una función del dominio de aplicación y de los resultados deseados.

De acuerdo a su naturaleza, las fibras se clasifican en tres grupos, los cuales son: fibras naturales, artificiales y sintéticas (López, 2015). Esta clasificación se esquematiza en la Figura 1.

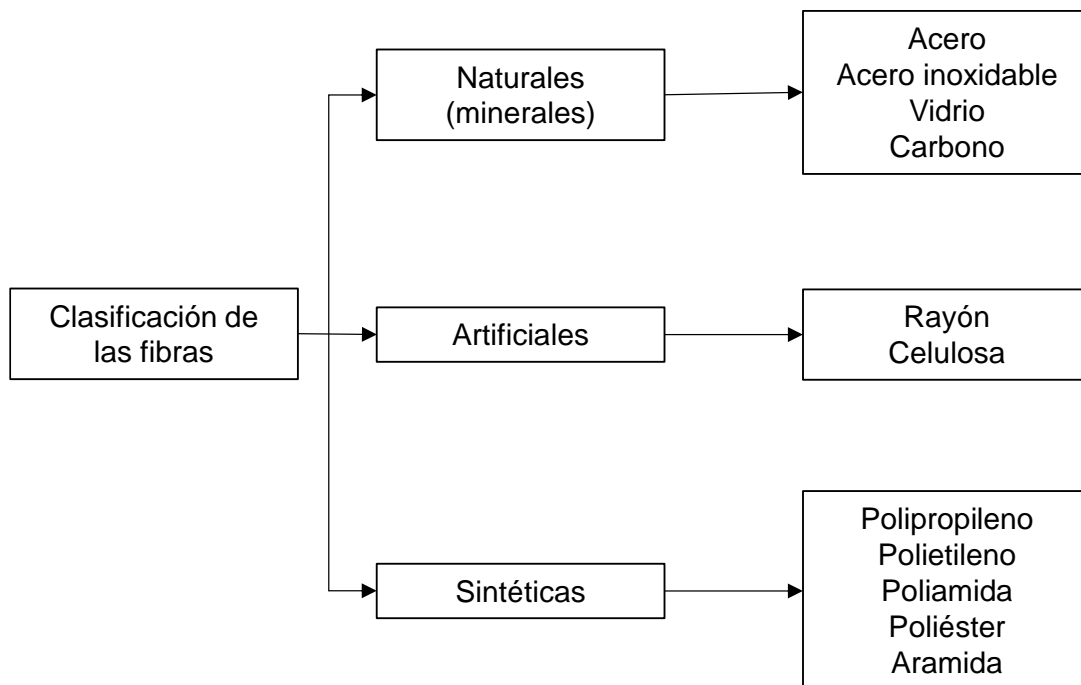


Figura 1. Clasificación de las fibras adaptada de López (2015)

El CRF tiene una gran variedad de aplicaciones para la ingeniería civil como en edificios, trabajos viales, actividades mineras, obras de mobiliario urbano. Entre dichas aplicaciones se encuentran (Alvarado, 2016):

- CRF colado en sitio: sistemas de piso industriales y comerciales, calzadas aeronáuticas, muelles portuarios, pavimentos sin juntas de contracción, revestimiento de túneles y galerías.
- CRF prefabricado: dovelas prefabricadas, paneles de fachada, elementos arquitectónicos.
- CRF lanzado (por vía seca o húmeda): revestimiento de túneles, estabilización de taludes y de excavaciones, sostenes provisionales o definitivos de obras subterráneas.
- Mortero con fibras lanzado para rehabilitación y refuerzo de obras.

En la Figura 2, se presentan imágenes que ejemplifican los usos y aplicaciones del CRF en diversas obras de ingeniería.



Dovelas prefabricadas en el Grand Paris Express,
Francia



Halle Intermodale de la Gare Saint Jean
Burdos, Francia



Revestimiento completo con CRF.
Carretera Durango-Mazatlán, México



Estabilidad de taludes, método Grid Beam System,
Japón

Figura 2. Ejemplos del empleo de CRF en obras de ingeniería

Entre las fibras de uso más común en la ingeniería se encuentran las fibras de polipropileno, vidrio y acero.

Las fibras de polipropileno (Figura 3.a) se obtienen por extrusión de polipropileno y se presentan en fajos. Tienen baja densidad, son poco reactivas químicamente pero muy susceptibles al calor por su bajo punto de fusión (160°C).

Al contrario que las fibras de acero no mejoran el comportamiento post-agrietamiento del concreto, por lo que se vuelven menos eficaces conforme el concreto envejece, aunque sí previenen el agrietamiento cuando el concreto es joven (Guiraud, 2018).

Asimismo, vuelven al concreto menos susceptible de sufrir desconchamientos al momento de descimbrar. El concreto reforzado con fibra de polipropileno tiene amplia utilización en la fabricación de mobiliario urbano, prefabricados y en concretos y morteros lanzados.

Las fibras de vidrio (Figura 3.b) proporcionan un refuerzo eficaz al concreto gracias a su rigidez y sus propiedades mecánicas. Aunque existen distintos tipos de fibras, las que se utilizan como refuerzo de concreto deben estar hechas a base de vidrio alcalino-resistente.

Su adición al concreto le confiere una mejora en la resistencia a tensión y mayor ductilidad, y también volverlo menos susceptible a la microfisuración (Guiraud, 2018).

Gracias a su fácil dispersión en el concreto es posible fabricar productos de formas muy variadas. Actualmente, el concreto reforzado con fibra de vidrio se utiliza en mobiliario urbano, fabricación de paneles de fachada, tuberías, cunetas y elementos prefabricados.

En cuanto a las fibras de acero el método más común de obtenerlas consiste en cortarlas a partir de alambre trefilado de acero con bajo contenido de carbono, su diámetro oscila entre 0.25 y 1.0 mm y su longitud entre 10 y 75 mm. Algunas fibras son encoladas juntas usando goma soluble al agua para facilitar el mezclado con el concreto.

Las fibras de acero que se usan para reforzar concreto deben tener longitudes cortas y ser lo bastante pequeñas para que se dispersen al azar en la mezcla de concreto (López, 2015). Generalmente las fibras deben tener una *relación de aspecto* (relación de longitud/diámetro) de aproximadamente 20 a 100. En la Figura 3.c se muestra una imagen de las fibras marca Bekaert Dramix 5D 65/60BG usadas en la construcción de los especímenes que se ensayaron en este trabajo. De acuerdo con la información contenida en la ficha técnica de éstas (Bekaert, 2017), las fibras tienen una longitud de 62 mm y un diámetro de 0.9 mm, por lo que su relación de aspecto es igual a 69. Una descripción más detallada de las propiedades del concreto reforzado con estas fibras se presenta en el capítulo 1.2.

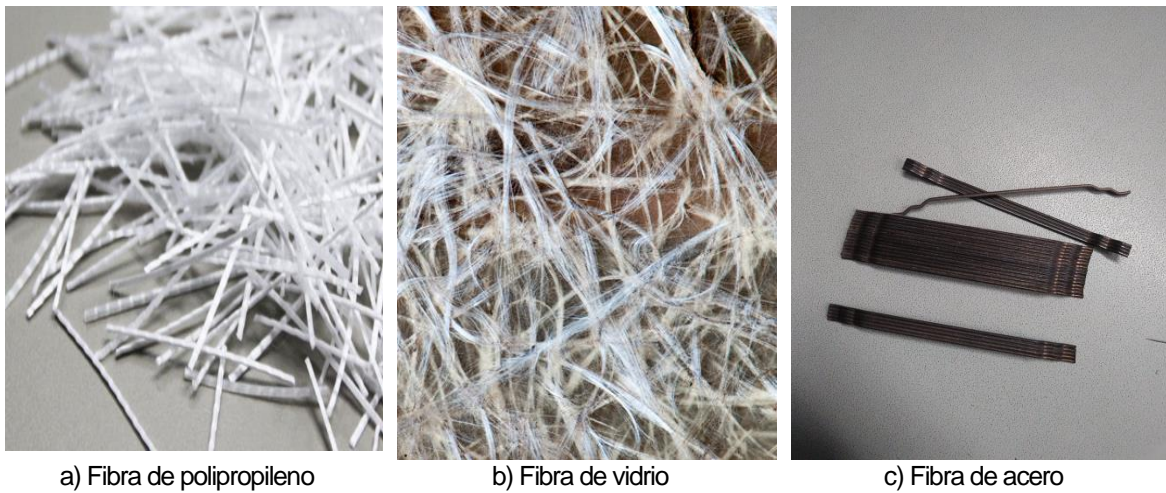


Figura 3. Fibras usadas como refuerzo de concreto

1.2 Concreto reforzado con fibra de acero (CRFA)

Las fibras metálicas, concretamente las de acero son las fibras más utilizadas para el refuerzo del concreto dada su eficacia y su precio. Cabe comentar que el acero tiene un módulo de elasticidad 10 veces mayor al del concreto, y sus fibras tienen una buena adherencia a la masa de concreto y son fáciles de mezclar. (Fernández, 1999)

Además, según Caballero (2017) se ha demostrado que en columnas fabricadas con CRFA sometidas a compresión simple se ha registrado un incremento de su capacidad de deformación y ductilidad, además de un desprendimiento tardío del recubrimiento de concreto.

De los trabajos de Fernández (1999) se pueden resumir algunos de los principales efectos que trae consigo la adición de fibra de acero al concreto:

- Mejoran el comportamiento a flexotensión
- Incrementan la resistencia a la rotura
- Reducen la deformación bajo cargas mantenidas
- Incrementan la resistencia a impacto y choque
- Controlan mejor la fisuración
- Aumentan la durabilidad del concreto

Entre las propiedades atribuibles al CRFA se pueden considerar las expuestas por Mármol (2010) quien recopiló una serie de ensayos relacionados con el concreto con fibras (acero, vidrio y polipropileno) y comparó sus características mecánicas. Entre sus conclusiones se citan las siguientes:

- La adición de fibras metálicas no aumenta significativamente la resistencia a compresión, los aumentos producidos oscilan entre 4 y 19%.
- Las fibras aumentan la resistencia a cortante proporcionalmente a la dosificación de la misma. El uso de sistemas combinados de armado tradicional y fibras conduce a notables incrementos en la ductilidad.
- La adherencia aumenta de acuerdo con la esbeltez de la fibra, dicha adherencia propicia el llamado “cosido de la grieta” después de la fisuración. Esto se aprecia esquemáticamente en la Figura 4.
- La adición de fibra de acero genera comportamientos mecánicos que propician la aparición de un mayor número de grietas, pero con valores de apertura menores.
- Si se combina el CRFA con un armado tradicional el material presenta un comportamiento más dúctil y con menor tendencia a la degradación de resistencia.

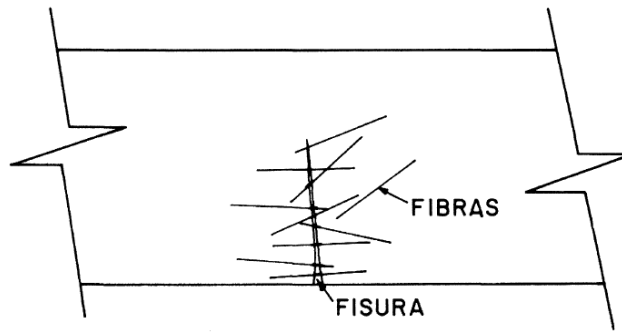


Figura 4. Mecanismo de cosido de la grieta

En un estudio de Gallo-Arciniegas (2013) se hizo una investigación experimental y analítica sobre el comportamiento del CRFA para estimar sus principales propiedades, llegando a las siguientes conclusiones:

- El valor del peso unitario del CRFA permaneció casi constante si se incrementa el volumen de fibras en la mezcla. No obstante, el contenido de aire aumentó con el mismo. Este aire es introducido al momento de mezclar las fibras con el concreto.
- Cuando se aumenta el contenido de fibras la resistencia a compresión disminuye levemente a causa de la sustitución del agregado grueso por las fibras y el aumento de contenido de aire incluido en el momento del mezclado. Para efectos prácticos se puede suponer que la resistencia a compresión del CRFA es la misma que la del concreto simple.
- Las fibras de acero le generan un efecto de confinamiento al concreto, disminuyendo su relación de Poisson conforme aumenta el contenido de fibras.

Es de señalar que actualmente el uso de CRFA para aplicaciones estructurales es secundario, siendo mayormente utilizado como suplemento en el control del agrietamiento y aumento en la resistencia al impacto. En estos casos el CRFA combinado con refuerzo de acero convencional ha arrojado buenos resultados según Carrillo et al. (2013).

1.3 Uniones muro –losa de CRFA

Hernández (2018) realizó ensayos experimentales para evaluar la capacidad de las uniones muro–losa en tres especímenes. Uno de ellos fue reforzado sólo con barras de acero, otro fue fabricado sólo con fibras metálicas y uno más reforzado de manera mixta (es decir barras y fibras de acero). Obtuvo los siguientes resultados:

- El módulo de elasticidad del CRFA disminuyó alrededor de 20% con respecto al del concreto simple.
- El comportamiento de las uniones en el intervalo elástico de éstas (hasta 0.25% de distorsión de entrepiso) fue muy parecido, sin que influyera el tipo de refuerzo del espécimen.
- Las uniones de CRFA presentaron capacidades de deformación de hasta 1% de distorsión sin sufrir daño significativo, por lo que mostraron una gran capacidad de deformación.
- A medida que se sustituyó el refuerzo a base de varillas corrugadas por fibras de acero, el modo de falla cambió de aplastamiento y desconchamiento del concreto con alta distribución de grietas a una falla concentrada en una sola grieta de gran espesor.
- Al usar fibras, las grietas se cerraban en los ciclos de carga que correspondían a esfuerzos compresivos.
- Cuando la trayectoria de la falla se definía sobre la losa, las deformaciones se concentraron en rotaciones plásticas bien definidas.

Abdul (2012) estudió el comportamiento de una junta muro-losa en un sistema de túnel sometido a carga cíclica lateral. El objetivo fue evaluar un sistema modular llamado Sistema de Construcción Industrializada, de uso muy común para la construcción de casas y condominios en Malasia. Sus conclusiones fueron las siguientes:

- La capacidad resistente a momento teórico fue levemente más alta que la capacidad de momento del experimento, no obstante, hay una buena relación entre ambos.
- La ductilidad teórica fue más alta que la ductilidad experimental. La ductilidad de la junta muro–losa estuvo por debajo del requisito de ductilidad sísmica que oscila entre 3 y 6.
- 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.

2. Descripción del experimento

Se fabricaron dos especímenes de concreto reforzado con fibras en escala 1:1. Los especímenes fueron prefabricados y sus detalles se especifican en las secciones siguientes.

2.1 Configuración y geometría

Los extremos de la losa de los especímenes estuvieron apoyados sobre dos soportes cuadrados con orificios para el paso de las barras y tuercas para sujetarlos. Dichos soportes, a su vez, estuvieron anclados al piso del laboratorio. Debajo del centro del cabezal inferior se colocó un cajón metálico con un rodillo de acero sobre el cual reposaba el espécimen a ensayar y facilitar el desplazamiento de dicho cabezal.

Se utilizaron además dos actuadores hidráulicos de 50 t, uno para cada cabezal superior y otro para el inferior. Dichos actuadores estuvieron conectados mediante placas metálicas al muro de reacción como a los cabezales como se muestra en la Figura 5.

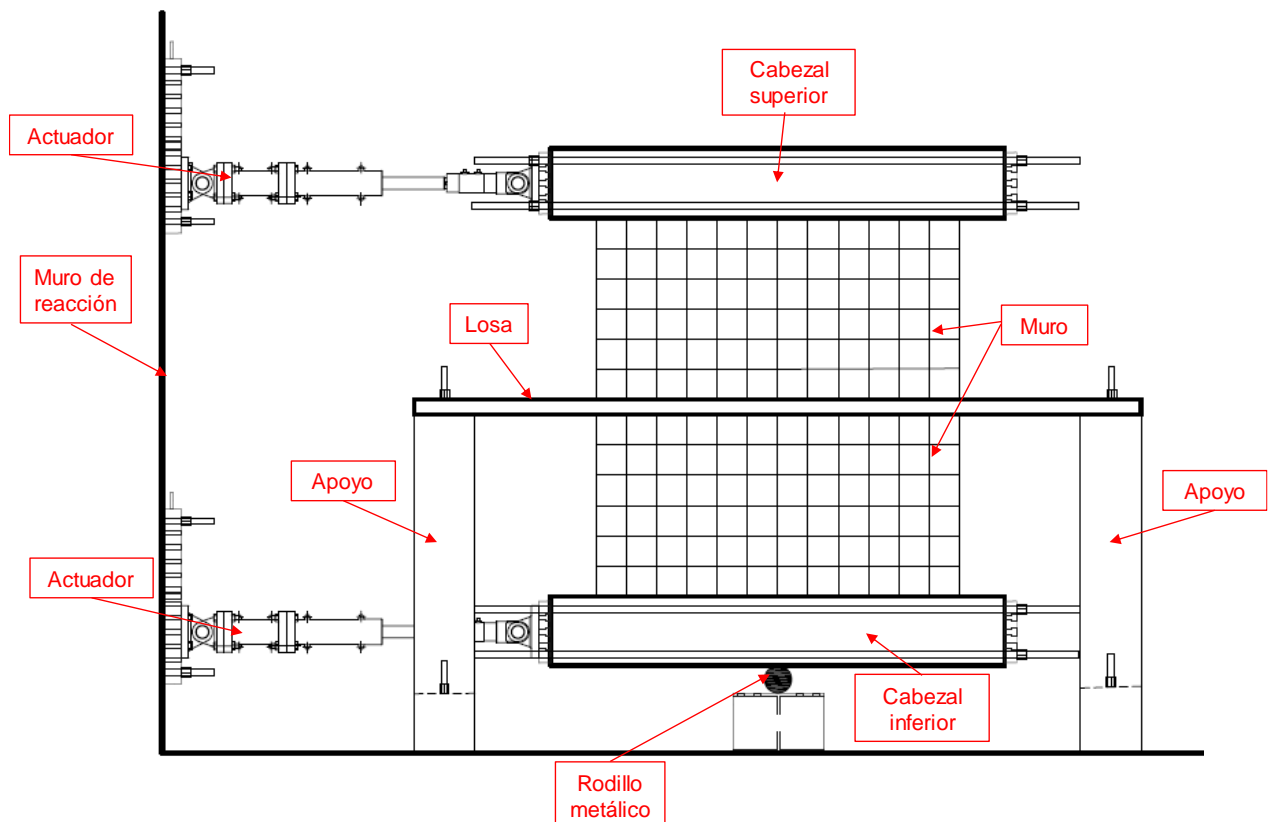


Figura 5. Esquema de las pruebas

Muros y losas se fabricaron por separado. Después las piezas se unieron con concreto reforzado con fibras. Las losas del primer espécimen, al que llamaremos Fibras de aquí en adelante, fueron reforzadas únicamente con fibras de acero. Las losas del segundo espécimen, al que llamaremos espécimen Mixto, contaban con refuerzo de varillas de acero de 3/8" en forma de parrilla a cada 20 cm y fibras de acero igualmente. Las dimensiones de las losas prefabricadas fueron de 1.1 x 2.7 m en ambos casos

Las uniones muro-losa se hicieron con varillas de 3/8" con 20 cm de longitud, y concreto fabricado en el sitio reforzado con fibras de acero Dramix 5D 65/60BG como se muestra en las Figura 6 y Figura 7.

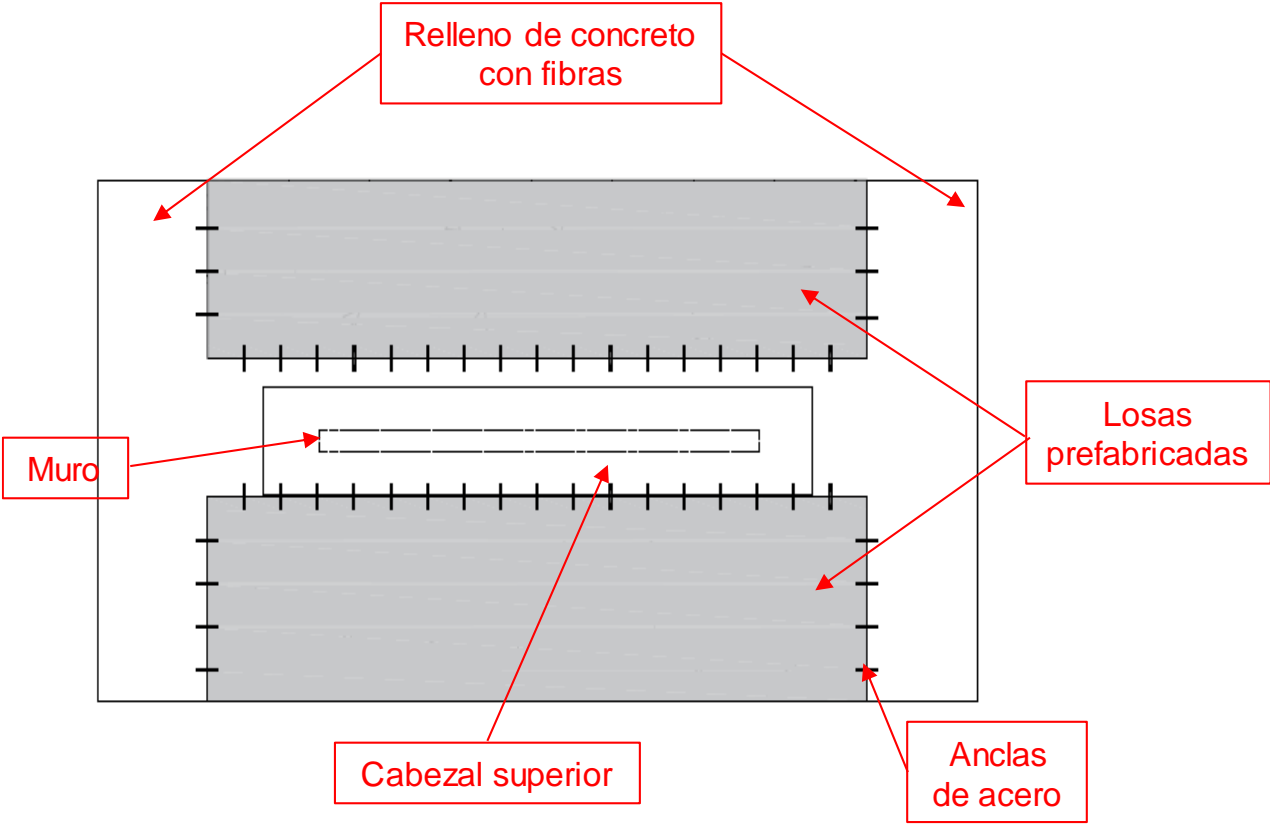


Figura 6. Esquema y ubicación de losas prefabricadas



Figura 7. Detalle de los anclajes de varilla

En las Figura 8 aFigura 10 se muestran las dimensiones de los especímenes. Se puede ver que el muro tenía una altura de 2.54 m por 2.40 m de ancho, las dimensiones finales de la losa incluyendo losas prefabricadas y relleno de CRFA fueron 2.4x4.8 m, con 10 cm de espesor.

Los cabezales medían 50x46 cm y 3 metros de largo. En total, el modelo visto de frente medía 3.46 m de alto por 4.8 m de largo.

En la Figura 11 se presenta el estado final tras realizar el montaje de los modelos en sus soportes. Nótese que se conectaron dos gatos hidráulicos al espécimen, uno en el cabezal superior y otro en el cabezal inferior para aplicar carga cíclica al espécimen; tal y como se describió al inicio de esta sección.

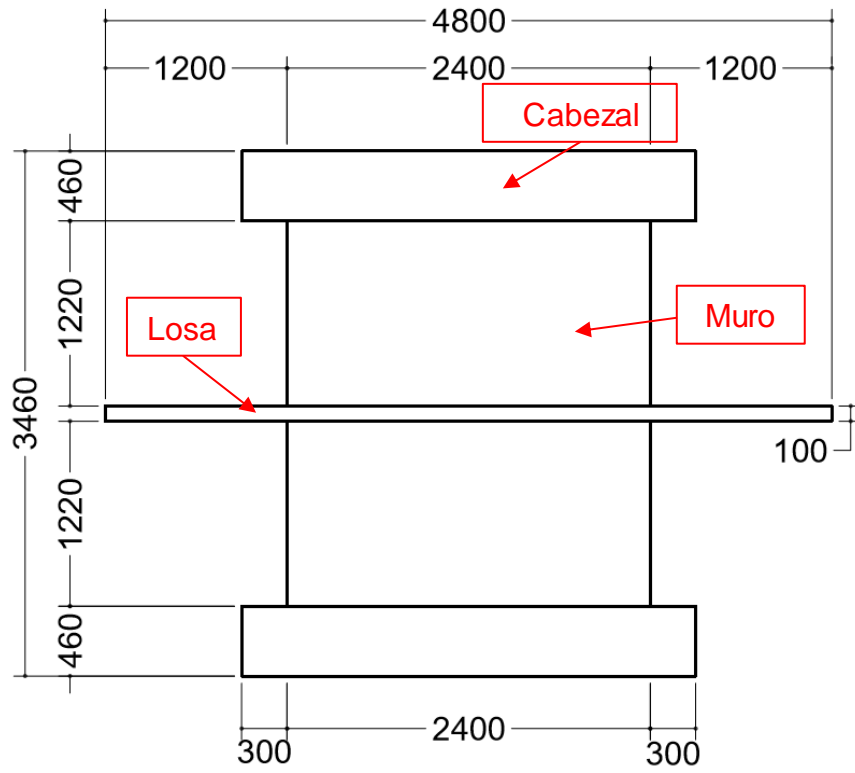


Figura 8. Vista frontal del espécimen (acot. en mm)

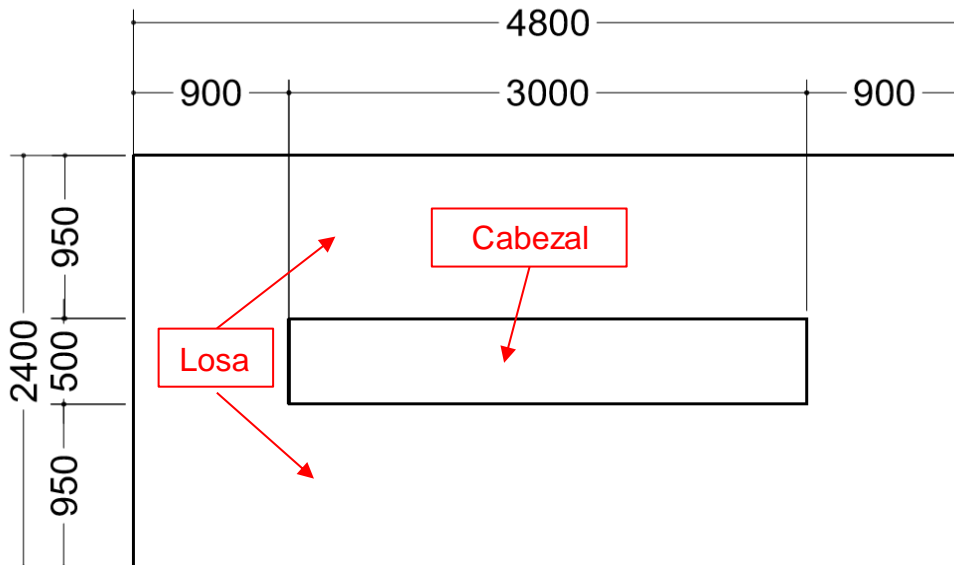


Figura 9. Vista superior del espécimen (acot. en mm)

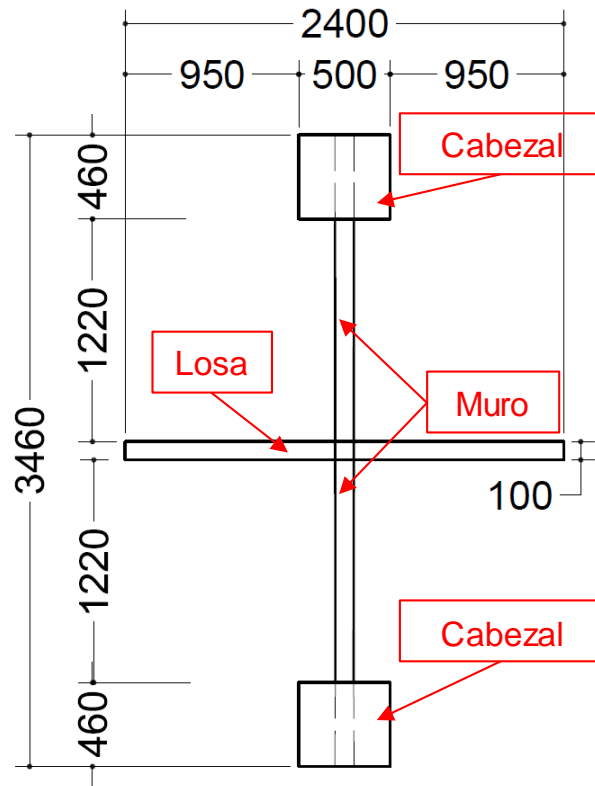


Figura 10. Vista lateral (acot. en mm)



Figura 11. Montaje final del espécimen

2.2 Materiales

El armado de los cabezales consistió en 4 varillas del número 4 y 4 del número 3 con estribos del número 3 espaciados a cada 20 cm.

Los muros fueron prefabricados a base de CRFA con una dosificación de 30 kg/m³. En el caso del muro usado en el espécimen Mixto se contaba con una parrilla de refuerzo de varillas del número 3 colocadas a cada 40 cm. El muro del espécimen Fibras no llevó refuerzo.

En las losas y los muros prefabricados se utilizó concreto con resistencia nominal $f'c = 350$ kg/cm².

Las losas prefabricadas destinadas al modelo Mixto llevaron una parrilla de varillas del 3 a cada 20 cm.

Para el caso de las juntas, que fueron coladas en sitio, se utilizó concreto fabricado en sitio con resistencia nominal $f'c = 350$ kg/cm², agregado grueso con tamaño máximo 15 mm, varillas de acero corrugado con resistencia nominal $f_y = 4200$ kg/cm², fibras Dramix 5D 65/60BG, trefilada al frío, con anclajes en los extremos, encolada en fajos.

2.3 Detalles de colado de las uniones de los especímenes

Antes de proceder al colado de las uniones de los especímenes se hicieron los armados de las juntas de cada losa prefabricada mediante varillas corrugadas del número 3. Antes de fabricar el concreto en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del CENAPRED, las fibras se pesaron y dividieron en lotes de 10 kg por mezcla (Figura 12), para posteriormente añadir las fibras directamente a la mezcladora, la mezcla se realizó por aproximadamente 10 minutos antes de proceder al colado de la superficie.

La cantidad total de concreto fabricada para las uniones fue de 0.6 m³ y se utilizaron en total 50 kg de fibras, por lo que la dosificación final del concreto utilizado en las uniones fue de 75 kg/m³.

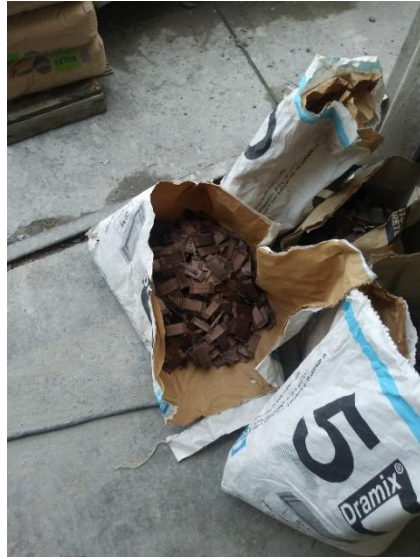


Figura 12. Lotes de fibra para el colado

Una vez fraguado el concreto, se colocaron 60 lingotes de plomo como carga vertical distribuidos en tresbolillo en toda la superficie del espécimen para repartir mejor la carga sobre la losa. Cada lingote pesaba aproximadamente 50 kg, por lo que la carga total sobre la losa fue de 3 toneladas. Esto se hizo con objeto de simular los efectos de la carga muerta sobre una losa de entrepiso. La Figura 13. Muestra una fotografía del espécimen con los lingotes de plomo sobre la losa. Se aprecia también el muro de reacción y el actuador hidráulico superior.



Figura 13. Lingotes sobre la losa

En el caso del primer espécimen, dado que las losas no contaban con más refuerzo que las fibras de acero, de manera preventiva se colocaron unos apoyos de madera con objeto de prevenir caídas de material que dañasen los instrumentos, su posición se indica en la Figura 14. Los apoyos nunca estuvieron en contacto con la losa, sólo se colocaron por debajo, a manera de prevención en caso de falla súbita, con una separación de 10 cm de la losa.

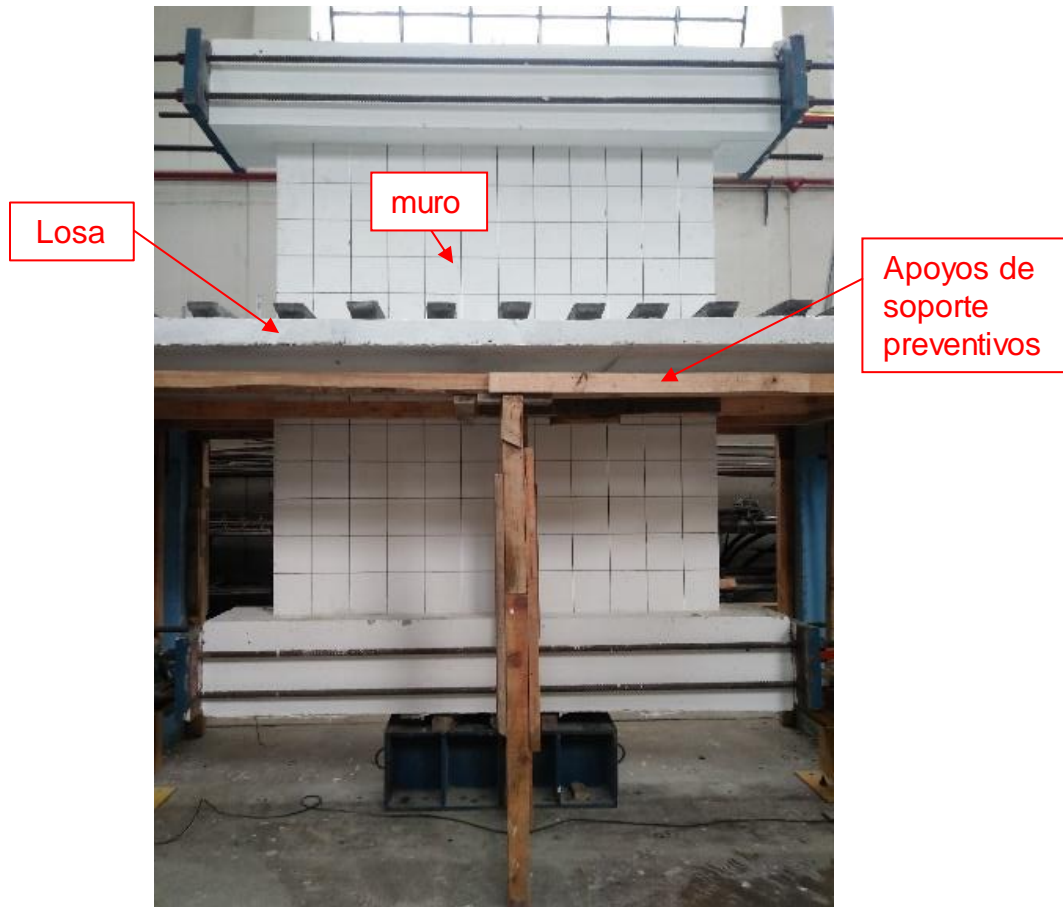


Figura 14. Ubicación de los puntales preventivos de madera

2.4 Instrumentación

A lo largo de la parte superior de la losa detrás del muro se colocaron 13 transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT) para medir las deformaciones sobre la losa. Los LVDT fueron nombrados consecutivamente desde el V1 al V13 (Figura 15). También, se colocaron dos LVDT en los cabezales del espécimen, uno en el cabezal superior y otro en el cabezal inferior. Éstos se denominaron H1 y H2 (Figura 16). La cuadrícula dibujada sobre los especímenes fue de 20x20 cm medidos a partir del lecho superior de la losa. Ésta fue colocada sólo con fines ilustrativos.

No se utilizó instrumentación interna (deformímetros) en este estudio.

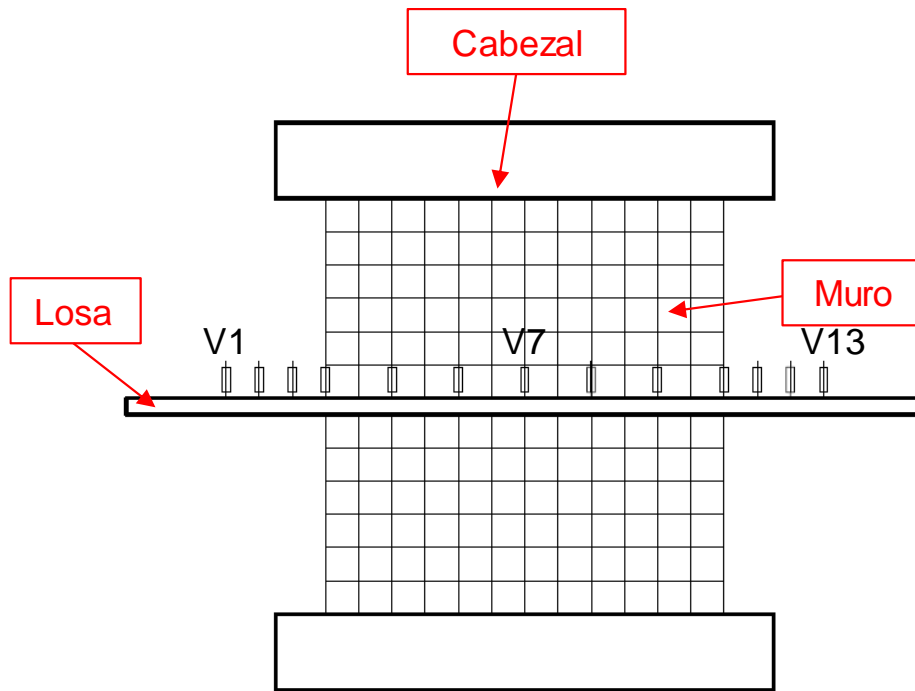


Figura 15. Instrumentación sobre la losa

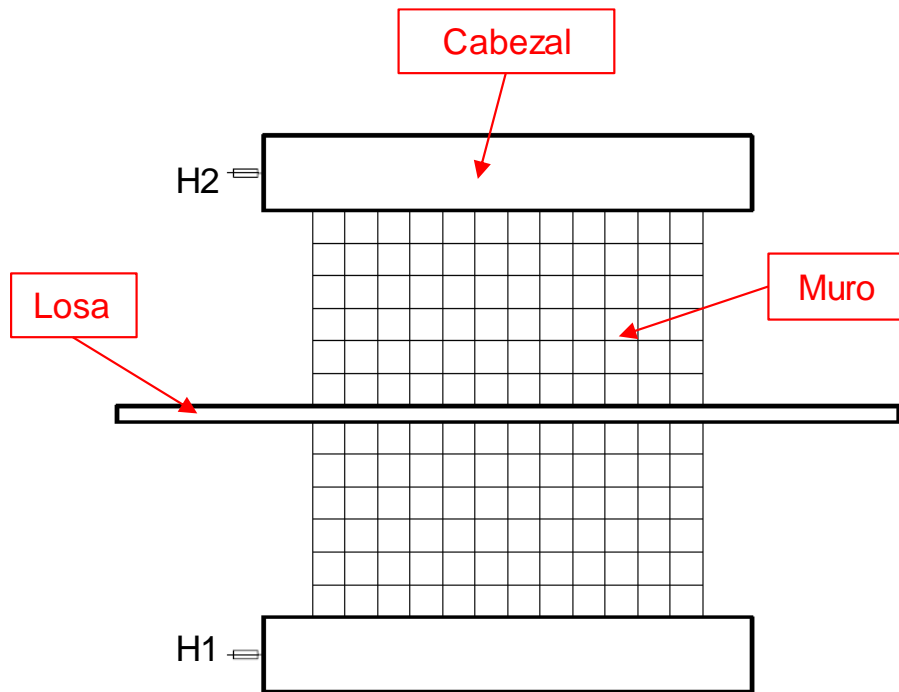


Figura 16. Instrumentos en los cabezales

Para colocar los LVDT sobre la losa, se instaló un perfil metálico para soportar los instrumentos (Figura 17). Los transductores V1 al V4 tenían una carrera de 50 mm y se colocaron a cada 20 cm en la parte posterior del muro, mientras que los LVDT V5 al V9 se colocaron a cada 40 cm y su carrera fue de 25 mm. Se finalizó con los transductores V10 al V13, que tenían una carrera de 50 mm y estaban colocados a cada 20 cm (como se muestra en el esquema de la Figura 15).

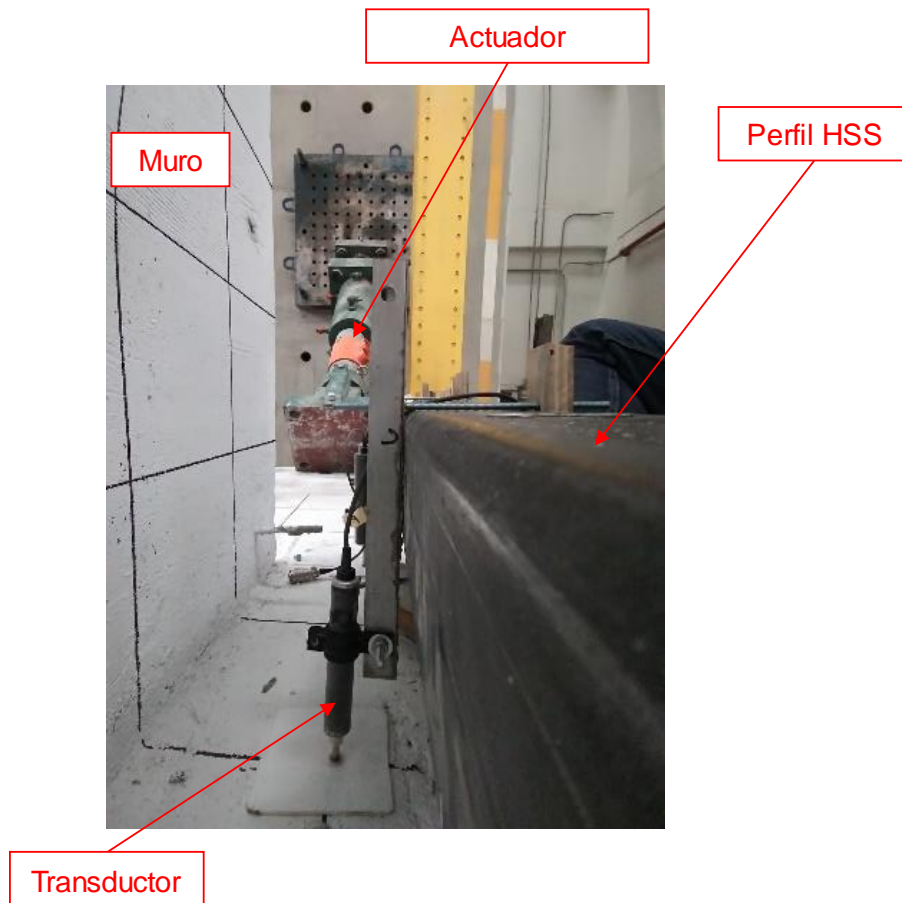


Figura 17. Transductores sobre la losa

Los gatos hidráulicos estuvieron anclados mediante placas metálicas al muro de reacción del laboratorio y aplicaron fuerza al centro de cada cabezal de cada espécimen. Los cabezales a su vez se confinaron con placas y barras de acero para conectar los actuadores y lograr aplicar la carga reversible (Figura 18 y Figura 19).

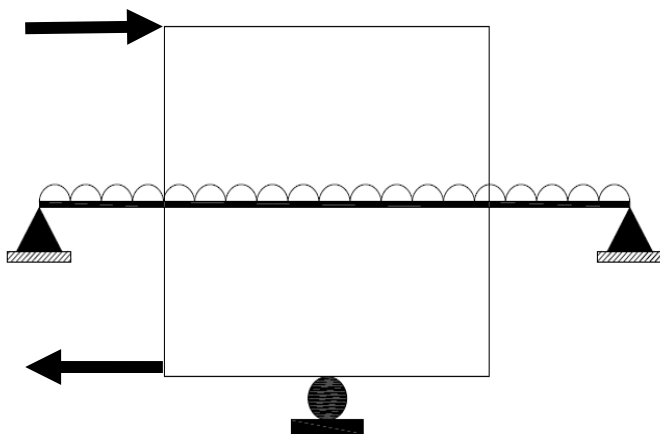


Figura 18. Placa de confinamiento en el cabezal superior.



Figura 19. Detalle de la conexión del actuador inferior

Adicionalmente, se colocó una base metálica con un rodillo de acero exactamente al centro del cabezal inferior para simular los efectos de un apoyo móvil (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



a) Diagrama de cuerpo libre



b) Fotografía del rodillo

Figura 20. Rodillo colocado bajo el espécimen

2.5 Protocolo de carga

El protocolo de carga aplicado a los especímenes se muestra en la Figura 21. Estuvo controlado por los desplazamientos medidos en el transductor H1 (según se muestra en la Figura 16).

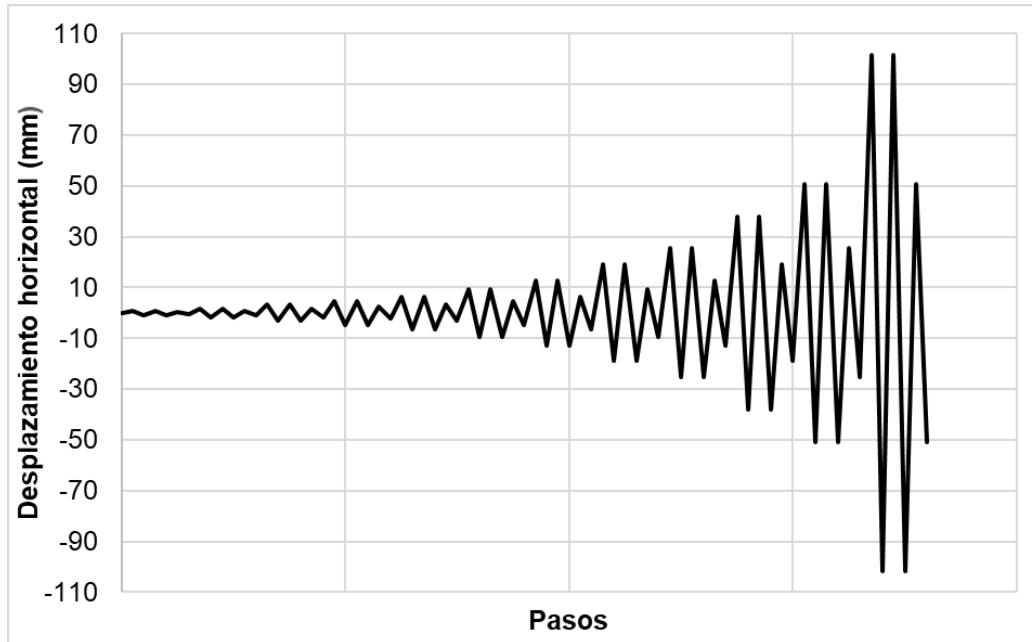


Figura 21. Historia de desplazamientos en LVDT H1

La historia de desplazamientos se basó en recomendaciones del ACI 374 (2013) y parte del desplazamiento de fluencia del espécimen. Utilizando algunos resultados obtenidos por Carrillo y Alcocer (2012), se observó que para especímenes con características similares a las de los modelos utilizados, bastaba una distorsión equivalente de fluencia de 0.25% de distorsión del muro. Por lo tanto, el desplazamiento de fluencia utilizado fue:

$$d_y = 0.0025H_m = 0.0025(2540) = 6.35 \text{ mm}$$

Bajo la configuración de la prueba el desplazamiento de fluencia estuvo compuesto por la suma de los desplazamientos absolutos medidos en los transductores H1 y H2. Antes de aplicar al modelo los incrementos indicados en la historia de desplazamientos se hizo un ciclo igual a la mitad del ciclo anterior para recentrar el espécimen y poder evaluar la degradación de rigidez.

3. Resultados experimentales

3.1 Resistencia del concreto

Se tomaron muestras del concreto utilizado en ambos especímenes y se ensayaron un total de 10 cilindros, 8 de concreto reforzado con fibras y 2 sin fibras.

Siete cilindros fueron de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, mientras que los tres restantes fueron de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Los ensayos se llevaron a cabo en la máquina universal del Laboratorio de Estructuras Grandes y estuvieron controlados por carga, con una velocidad promedio de aplicación de 20 t/min. Los resultados se muestran en la

Tabla 1 para cilindros con fibras y en la Tabla 2 para los cilindros sin fibras.

Se observa que las muestras del modelo Fibras tuvieron una resistencia mayor a la nominal (350 kg/cm^2) y un porcentaje de variación más bajo, mientras que los cilindros del modelo Mixto presentaron una resistencia 25% por debajo de la nominal.

En el caso de los cilindros sin fibra añadida en el concreto, el mayor f'_c se registró en el cilindro obtenido en el colado del espécimen 2. Ya que sólo se hizo una muestra por modelo no fue posible calcular coeficientes de variación en este caso.



Figura 22. Pruebas de cilindros de concreto

Tabla 1. Resistencias de cilindros con fibras

	Cilindro	φ (cm)	A (cm²)	P (kg)	f'c_{fibras}(kg/cm²)	f'c_{mixto}(kg/cm²)
Modelo Fibras	C1-M1	10	78.54	32,350	411.89	
	C1-M2	10	78.54	26,300	334.86	
	C1-M3	10	78.54	30,500	388.34	
Modelo Mixto	C2-M1	15	176.71	44,100		249.55
	C2-M2	15	176.71	48,200		272.76
	C2-M3	15	176.71	51,600		292.00
	C2-M4	15	176.71	34,800		196.93
	C2-M5	15	176.71	53,400		302.18
				Promedio	378.36	262.68
				σ_x	32.23	37.46
				CV%	8.52	14.26

Tabla 2. Resistencias de cilindros sin fibras

	Cilindro	φ (cm)	A (cm²)	P (kg)	f'c_{fibras}(kg/cm²)	f'c_{mixto}(kg/cm²)
Modelo Fibras	1N-M1	15	176.71	51,200	289.73	
Modelo Mixto	2N-M2	15	176.71	59,200		335.00

3.2 Condiciones iniciales de los modelos

Justo tras el inicio del ensaye del espécimen Mixto, al momento de aplicar la presión en ambos actuadores hidráulicos, se produjo un incremento de desplazamiento no contemplado. Ello ocasionó un agrietamiento inicial menor cuyo estado se especifica en la Figura 23. Es importante aclarar que esto no ocurrió en el modelo Fibras.

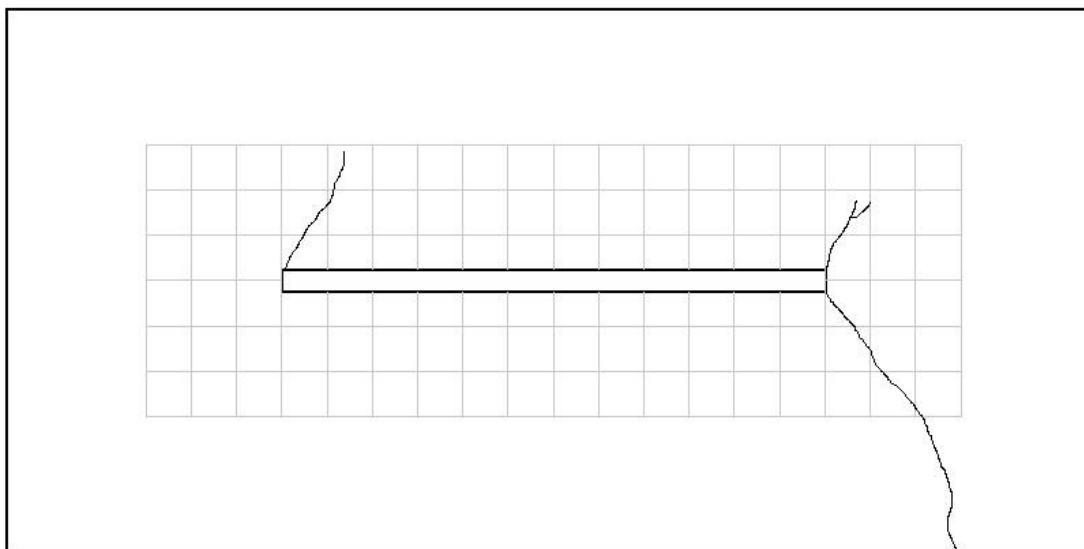


Figura 23. Estado inicial de agrietamiento Modelo Mixto

3.3 Curvas cortante-distorsión

En la Figura 24 se muestra una comparación del comportamiento de las curvas cortante-distorsión de ambos especímenes ensayados bajo las condiciones indicadas en el capítulo 2.1 y la historia de desplazamientos de la Figura 21.

En la Figura 25 se comparan las envolventes de la Figura 24 para los dos especímenes.

Tras los ensayos realizados se observó que ambos especímenes tuvieron un comportamiento histerético casi simétrico en los ciclos de carga positivos y negativos. Adicionalmente, es de notar la semejanza de las curvas envolventes hasta una distorsión del 1%, donde el espécimen Mixto presenta importantes incrementos de cortante respecto al espécimen Fibras.

El espécimen Fibras fue el que presentó una degradación de resistencia más apreciable. En ese espécimen la prueba se detuvo antes de alcanzar una distorsión del 6%.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y 4 se presenta una comparación de los valores máximos de cortante registrados en los ciclos positivos y negativos para ambos especímenes y su correspondiente degradación de resistencia.

La Figura 26 muestra la apariencia de los modelos en el último ciclo de aplicación de carga a que fue posible someterlos.

Se puede observar que la mayor apertura de las grietas se presentó en el modelo Fibras, la deformada de la losa para grandes distorsiones tenía un comportamiento tipo zigzag pronunciado en el espécimen Fibras y poco marcado en el espécimen Mixto. Cabe aclarar que fue este último el que fue sometido a una mayor distorsión.

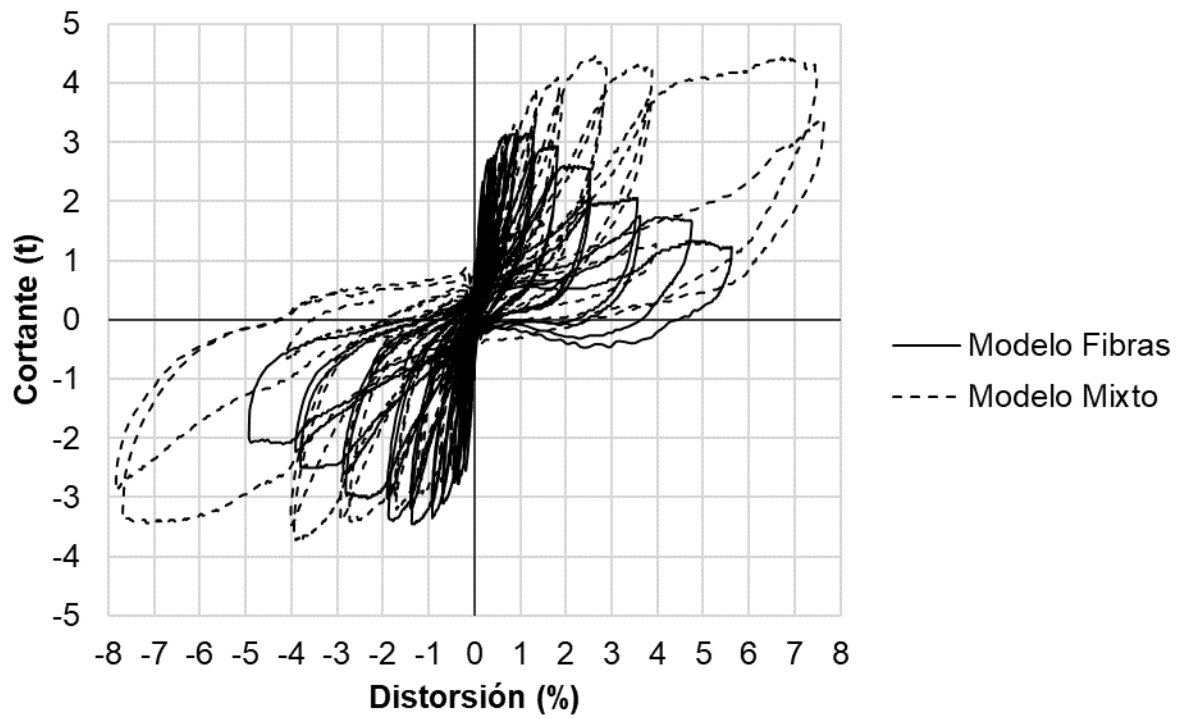


Figura 24. Curvas de histéresis cortante-distorsión

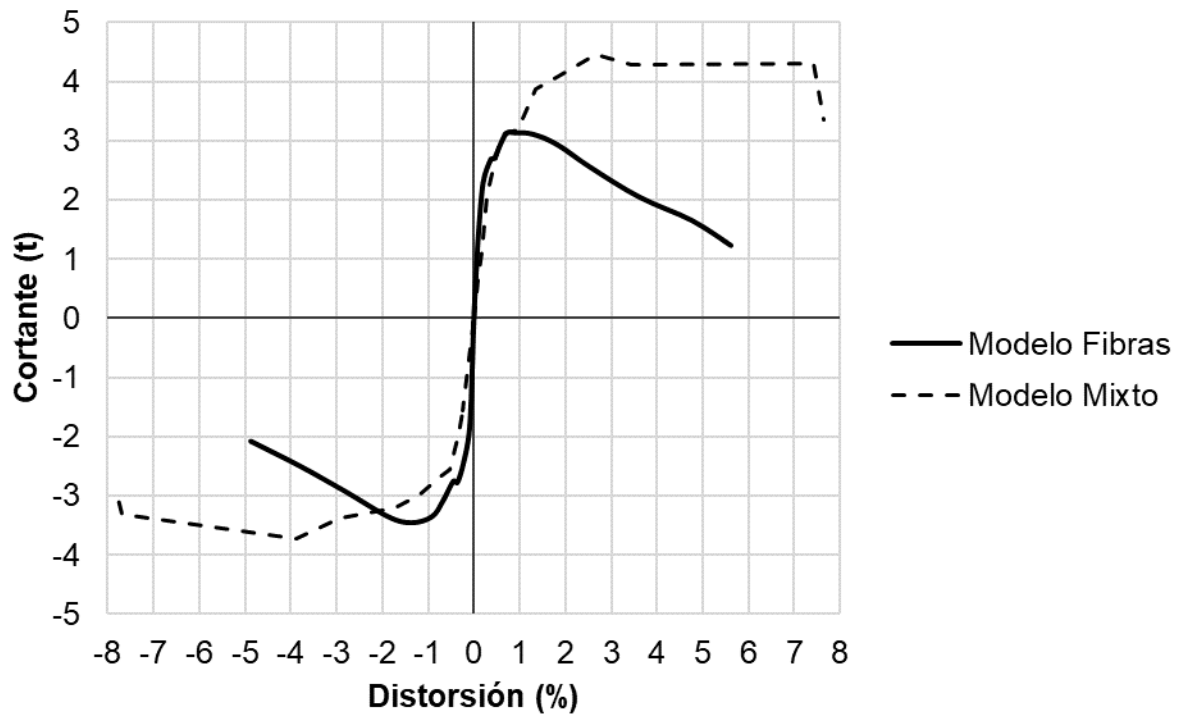


Figura 25. Envolventes de histéresis cortante-distorsión



a) Espécimen Fibras



b) Espécimen Mixto

Figura 26. Especímenes deformados en el nivel de desplazamiento máximo

Tabla 3. Degradación de resistencia de los modelos en los ciclos positivos

Espécimen	Cortante máximo		Último ciclo		Degradación de resistencia (%)
	Distorsión (%)	Cortante (t)	Distorsión (%)	Cortante (t)	
Fibras	0.89	3.13	5.62	1.23	60.8
Mixto	2.67	4.45	7.64	3.34	24.9

Tabla 4. Degradación de resistencia de los modelos en los ciclos negativos

Espécimen	Cortante máximo		Último ciclo		Degradación de resistencia (%)
	Distorsión (%)	Cortante (t)	Distorsión (%)	Cortante (t)	
Fibras	-1.37	-3.45	-4.88	-2.07	39.9
Mixto	-3.72	-3.89	-7.82	-2.87	22.7

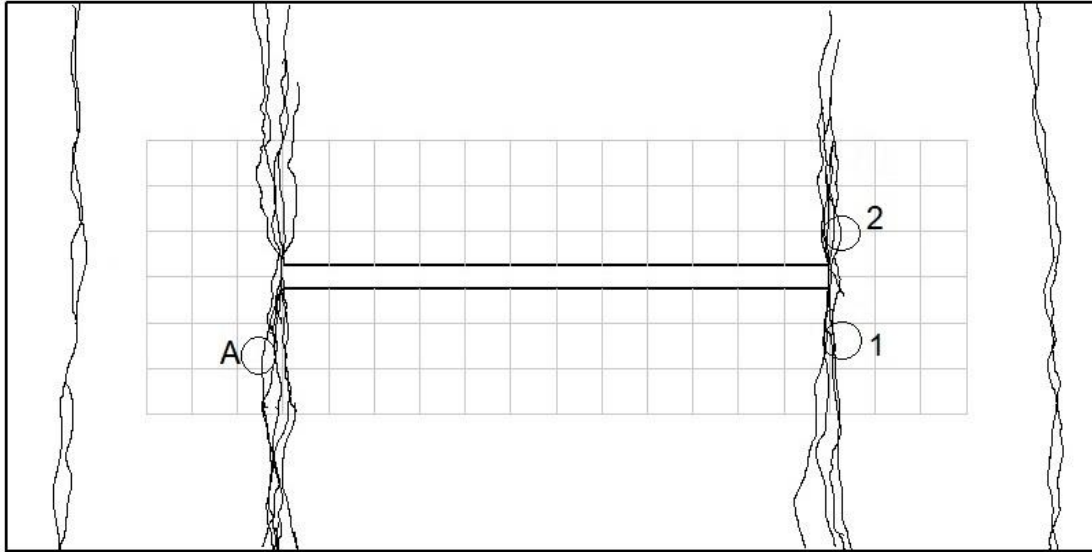
Los muros de los dos especímenes no presentaron deformaciones ni agrietamientos significativos, lo que indica que éstos se movieron como cuerpos rígidos.

Como se observó en la Figura 25, el usar únicamente las fibras como refuerzo en el espécimen Fibras provocó que se presentara una mayor y más rápida degradación de la rigidez que en el espécimen Mixto. Se aprecia que hasta una distorsión de entepiso de 1% el comportamiento de ambos especímenes es muy similar, lo que indica que el refuerzo sólo con fibras resultara útil para baja demanda sísmica. Después del 1% de distorsión el comportamiento difiere en gran medida.

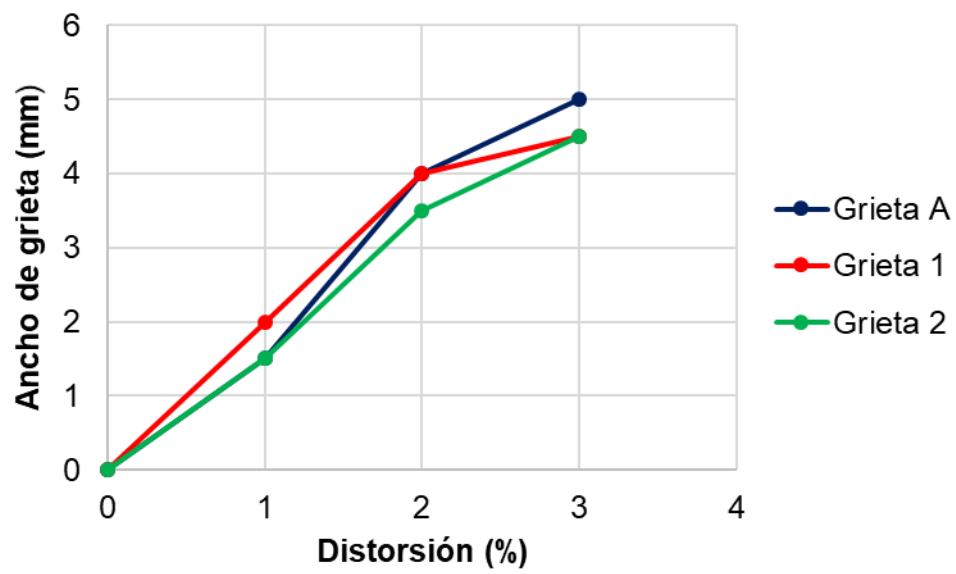
3.4 Evolución de grietas marcadas

Durante los ensayos de los especímenes se midieron algunas grietas. Su posición y evolución se indica en las Figura 27 y Figura 28 para los especímenes Fibras y Mixto, respectivamente. Dichas medidas fueron graficadas sólo para los ciclos de carga positivos.

Como puede verse, a mayor distorsión las grietas fueron cada vez más anchas. Sin embargo, en ambos especímenes las grietas tendían a cerrarse en los ciclos opuestos a la aplicación de carga.

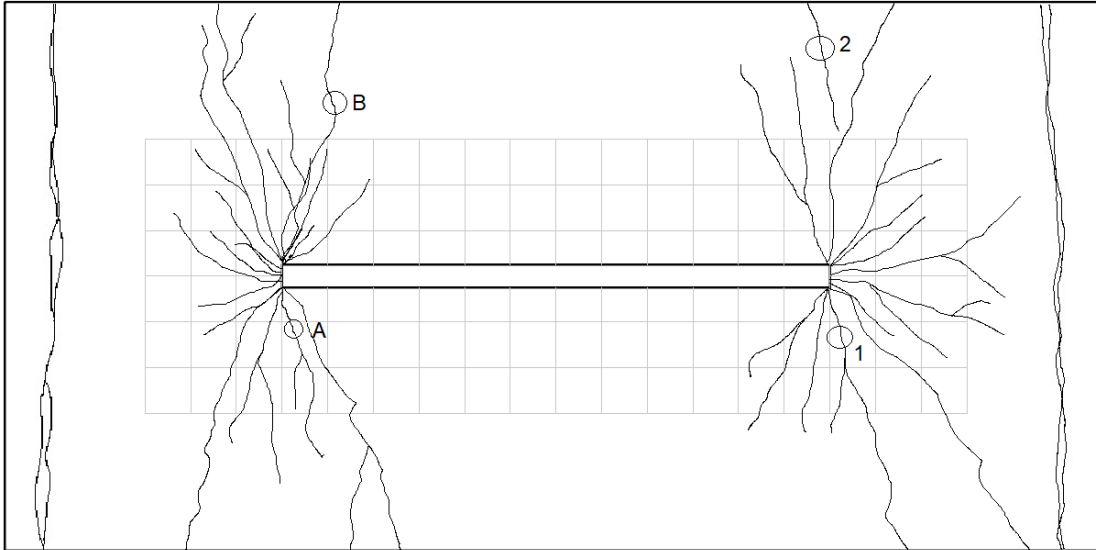


a) Ubicación de grietas de control y estado de agrietamiento final

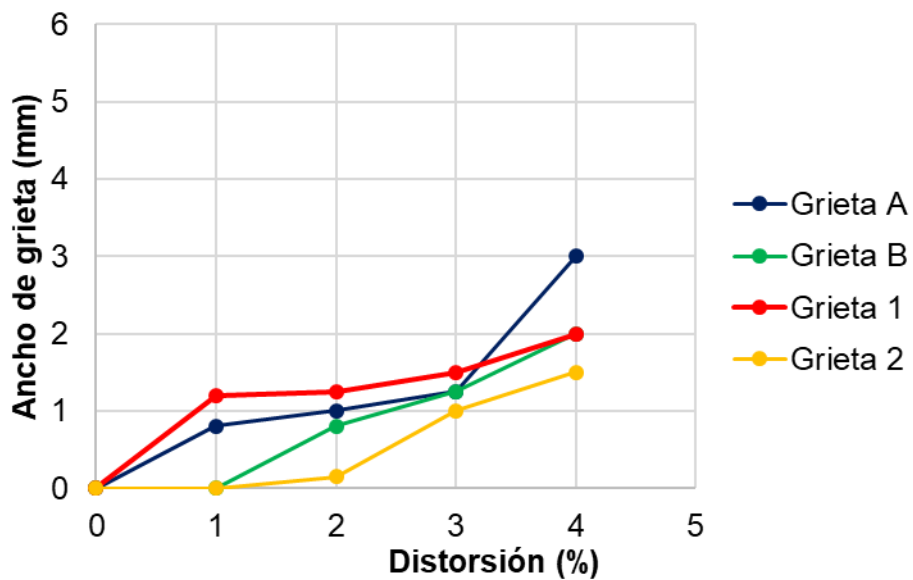


b) Evolución del ancho de grietas

Figura 27. Grietas en espécimen Fibras



a) Ubicación de grietas de control y estado de agrietamiento final



b) Evolución del ancho de grietas

Figura 28. Grietas en espécimen Mixto

Comparando las Figura 27 y Figura 28 se puede ver que, para grandes distorsiones, el espécimen Fibras registró anchos de grieta mayores que el espécimen Mixto. Se aclara que por cuestiones de seguridad no fue posible continuar midiendo los anchos de grietas más allá de distorsiones superiores a 4%.

3.5 Daños visuales e inspección post-prueba

Después de realizar una inspección visual, se pudo ver que el daño se concentró en las losas de ambos especímenes; principalmente en las zonas de unión muro-losa y apoyo-losa.

En el caso del espécimen Mixto el daño estuvo distribuido en grietas con forma de abanico partiendo desde la orilla del muro hacia los extremos de la losa, aumentando conforme lo hacía la distorsión. En el espécimen Fibras el daño se concentró principalmente en una grieta perpendicular al extremo del muro a lo ancho de toda la losa. Ambos especímenes presentaron un agrietamiento paralelo a la ubicación de los apoyos. En las Figura 29 y Figura 30 se muestra el daño visual en los modelos a diferentes niveles de distorsión. Se pueden ver con mucha claridad los patrones de agrietamiento descritos.



4% de distorsión



5.6% de distorsión

Figura 29. Daño visual en el espécimen Fibras



2% de distorsión



7.6% de distorsión

Figura 30. Daño visual en el espécimen Mixto

Después de las pruebas, se procedió a la demolición de las losas y muros de los modelos y se hizo la revisión de algunos aspectos constructivos. Como se muestra en la Figura 31 la parrilla de varillas de la losa prefabricada del espécimen **Mixto** quedó relativamente colocada en el centro del espesor la losa. Esto pudo haber contribuido al comportamiento simétrico de los ciclos de histéresis del modelo presentados en la Figura 24.



Figura 31. Colocación del armado de la losa

Con respecto a las fibras metálicas, a pesar de que se agregaron directamente a la olla y se mezclaron durante 10 minutos aproximadamente, se detectaron partes con aglomeraciones e incluso paquetes sin separar de más de 4 fibras. En general se apreció una buena distribución aleatoria de las fibras en el espécimen Fibras (Figura 32).



Figura 32. Distribución aleatoria de las fibras en el concreto

Al momento de la demolición de los especímenes, y gracias al modo de falla del modelo Fibras, se pudo obtener la cantidad de fibras que se encontraban en la sección transversal del modelo. Dicha cantidad fue de 1126 fibras. De acuerdo con la ficha técnica de éstas (Bekaert, 2017) cada fibra tiene un diámetro de 0.9 mm, por lo que la cuantía de fibras resultante en el área fue de aproximadamente $\rho=0.00293$.

4. Conclusiones y recomendaciones

Se hicieron ensayos de dos especímenes de uniones muro-losa prefabricadas de concreto reforzado con fibras de acero. Se midió su comportamiento estructural mediante la aplicación de carga cíclica reversible, controlada por desplazamientos. Se presentaron los resultados obtenidos en términos de resistencia y capacidad de deformación entre los dos especímenes ensayados. Se ofrecen las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Los valores de resistencia obtenidos en las pruebas de cilindros de CRFA no registraron un incremento importante por las fibras. Tampoco se observó un coeficiente de variación significativo.
- En ambos especímenes, el comportamiento de los especímenes muro-losa hasta aproximadamente 1% de distorsión fue muy similar.
- Las conexiones muro-losa de CRFA ensayadas soportaron hasta 1% de distorsión de entrepiso sin daño significativo. A modo de comparación los muros a ese nivel de distorsión presentan un gran nivel de daño o incluso colapso, por lo que se deduce que un muro es más susceptible de fallar que la unión de éste con la losa.
- Cuando el refuerzo a base de varillas se sustituye completamente por fibras de acero, el modo de falla se concentra en una grieta de gran espesor.
- Al combinar refuerzo de varillas con fibras de acero, se observó un modo de agrietamiento en forma de abanico. Esa observación es consistente con resultados reportados por Hernández (2018)
- Se recomienda desarrollar más trabajos de investigación sobre conexiones muro-losa de CRFA variando la dosificación de fibras o el proceso constructivo, para entender mejor su comportamiento ante cargas sísmicas.

Referencias

- Comité ACI 374, C. A. (2013). *Guide for testing reinforced concrete structural*. Farmington Hills, Michigan, EEUU.
- Abdul, H. (2012). *Seismic Performance of Wall-Slab Joints in Industrialized Building System (IBS) Under Out-of-Plane Reversible Cyclic Loading*. Malasia. pp.26 y 32.
- Alvarado, J. M. (2016). Losas de concreto reforzado con fibras de acero para infraestructura minera. *Horizonte Minero* vol.114. p.38.
- Bekaert. (2017). *Ficha técnica de fibras tipo CE Dramix 5D 65/60 BG*. Bélgica.
- Caballero, K. E. (2017). Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas. *PRISMA tecnológico, vol. 8 no.1*, p. 18.
- Carrillo J., A. W. (2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. 14 no. 3*, pp. 437,447,448.
- Carrillo, J., & Alcocer, S. (2012). *Shaking Table Test of Steel Fiber Reinforced Concrete Walls for Housing*. 15 WCEE.Lisboa, Portugal: pp.98
- Fernández, M. (1999). Hormigones reforzados con fibras de acero. *Informes de la construcción, vol. 342*, pp.13-18.
- Gallo L. (2013). Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 23 no. 1*, pp.117 y 131.
- Guiraud, P. (2018). *INFOCUMENTS*. Recuperado en marzo de 2020, de <https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres>
- Hernández, H. (2018). *Pruebas experimentales de uniones muro-losa de concreto reforzado con fibras de acero*. Tesis de maestría UNAM. México:
- 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*. Tesis de maestría UNAM. México:
- Mármol, P. (2010). *Hormigones con fibras de acero Características mecánicas*. Universidad Politécnica de Madrid, España, pp. 7,76 -79.