



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MUROS ESCALADOS DE HORMIGÓN CON  
FIBRAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL

CATALINA FRANCESCA RAMIREZ LATORRE

PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FABIÁN ROJAS BARRALES  
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE  
2024

# Resumen

Los muros de hormigón armado con fibras han sido considerados como una opción prometedora en la construcción debido a su resistencia y durabilidad, aunque su adopción en Chile ha sido limitada, especialmente en muros con confinamiento. Esto plantea desafíos y oportunidades para mejorar la eficiencia y seguridad de las estructuras en el país, ya que los muros deben resistir cargas laterales y sísmicas extremas.

En esta memoria se lleva a cabo un estudio que incluye tres probetas de muro escalados 1:3 de las mismas dimensiones y tipo de hormigón con diferentes configuraciones: una con hormigón tradicional y confinamiento en los bordes (muro 1), otra con confinamiento y fibra de acero Dramix 3D 65/35 en toda la estructura al 0.8% (muro 2), y una tercera sin confinamiento y con la misma fibra de acero en reemplazo volumétrico de las barras de refuerzo (muro 3). Las tres probetas se sometieron a ensayos cíclicos con una carga axial de 16 toneladas.

Los resultados del estudio mostraron que el muro 1 alcanzó un máximo de 10.6 tonf de carga con un desplazamiento de techo del 4%, con un modo de falla predominantemente a flexo-compresión en falla dúctil. El muro 2 tuvo una resistencia máxima de 11 toneladas, pero experimentó un corte anticipado de barras debido a problemas durante la instalación, lo que resultó en una menor disipación de energía y una curva de histéresis asimétrica, este tuvo el mismo modo de falla que el muro 1 llegando igual al 4% de drift. El muro 3 de reemplazo de barras de acero por fibra falló por corte debido a una grieta en el centro del muro, alcanzando una carga máxima de 10 toneladas y un drift del 2.5%.



*Dedicado a mi familia y amigos.*

# Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento, en primer lugar, a mis compañeras de grupo, Pilar Toledo y Paula Arteaga, así como a los profesores que me brindaron su apoyo durante el proceso de esta memoria. Específicamente, agradezco al Profesor Pedro y a Rodrigo por su invaluable ayuda en la construcción y montaje de los muros. También quiero reconocer la oportunidad proporcionada por mi profesor guía, Leonardo Massone, quien me permitió participar en esta enriquecedora experiencia de laboratorio.

No puedo dejar de mencionar el apoyo incondicional de mi familia, en especial a mi hermana Bárbara y mi padre Salvador, quienes siempre estuvieron presentes brindándome su apoyo. A mi madre, Paulina Latorre, le estoy especialmente agradecida por estar a mi lado durante los momentos más difíciles de mi carrera y por proporcionarme las herramientas necesarias para seguir adelante.

También agradezco a mis amigos de la universidad, Felipe, Jorge, Javiera, Sandra y Lore, quienes hicieron que este proceso fuera mucho más llevadero. Quiero destacar especialmente la compañía y el apoyo constante de Felipe, quien estuvo a mi lado en todo momento.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi pareja, Álvaro, por su ayuda y compañía durante esta última etapa de mi formación académica. Su apoyo fue fundamental para superar los desafíos y completar este importante proyecto.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo Principal . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	3
1.4. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Propiedades del Hormigón . . . . .	5
2.2. Antecedentes del uso de fibras . . . . .	7
2.3. Fibra de Acero . . . . .	8
2.4. Comportamiento mecánico de hormigón con fibras . . . . .	9
2.5. Respuesta a carga y deformación de muros . . . . .	12
<b>3. Metodología experimental</b>	<b>15</b>
3.1. Diseño y descripción Muros . . . . .	15
3.1.1. Diseño muro 1 y 2 . . . . .	16
3.1.2. Diseño muro 3 . . . . .	17
3.2. Materiales . . . . .	18
3.2.1. Hormigón . . . . .	18
3.2.2. Acero . . . . .	21

3.2.3. Fibra de acero . . . . .	23
3.3. Desarrollo constructivo . . . . .	23
3.3.1. Enfierradura . . . . .	23
3.3.2. Moldaje . . . . .	25
3.3.3. Hormigonado . . . . .	26
3.3.4. Reparaciones . . . . .	29
3.4. Montaje experimental . . . . .	31
3.5. Instrumentación . . . . .	33
3.6. Ensayo . . . . .	36
3.7. Adquisición de datos . . . . .	37
3.8. Fotogrametría . . . . .	38
<b>4. Resultados y Análisis</b>	<b>39</b>
4.1. Respuesta sistema de fundaciones . . . . .	40
4.2. Respuesta global muro 1 . . . . .	40
4.3. Evolución de daño . . . . .	41
4.4. Respuesta global muro 2 . . . . .	48
4.5. Flexión y corte muro 2 . . . . .	49
4.6. Evolución de daño muro 2 . . . . .	52
4.7. Respuesta global muro 3 . . . . .	62
4.8. Evolución de daño muro 3 . . . . .	63
4.9. Analisis Comparativo . . . . .	72
4.9.1. Resistencia . . . . .	72
4.9.2. Rigidez . . . . .	72
4.9.3. Deriva de techo y Energía . . . . .	74
4.9.4. Desplazamiento de techo y carga . . . . .	75
<b>5. Conclusiones</b>	<b>79</b>

<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>
.1. Anexo . . . . .	83

# Índice de Tablas

2.1. Propiedades mecánicas fibra de acero [7] . . . . .	9
3.1. Medidas probetas muro . . . . .	16
3.2. Datos diferencias muros . . . . .	17
3.3. Resultados ensayo compresión cilindros de hormigón . . . . .	19
3.4. Resultados ensayo a tracción . . . . .	20
3.5. Granulometría pre-mezcla hormigón . . . . .	21
3.6. Resultados ensayo a tracción en barras de acero . . . . .	22
3.7. Materiales hormigonado muro1 . . . . .	29
3.8. Materiales hormigonado muro 2 . . . . .	29
3.9. Materiales hormigonado muro 3 . . . . .	29
3.10. Protocolo de ensayo . . . . .	36
4.1. Resultados sistema de fundaciones . . . . .	40
4.2. Resistencia máxima muros . . . . .	72

# Índice de Ilustraciones

2.1. Esfuerzo de compresión Hormigón [6] . . . . .	6
2.2. Tipos de fibra de acero [7] . . . . .	8
2.3. Curvas tensión deformación fibra [7] . . . . .	9
2.4. Ensayo compresión [3] . . . . .	10
2.5. Ensayo tracción [3] . . . . .	11
2.6. Ensayo flexión vigueta [3] . . . . .	11
2.7. Diagramas de distribución de grietas de probetas en el estado último [4] . . .	13
2.8. Histeresis muro con y sin fibra[15] . . . . .	13
2.9. Energía muro Francisco Rodo [15] . . . . .	14
3.1. Diseño armadura original . . . . .	16
3.2. Diseño armadura reemplazo de acero . . . . .	17
3.3. Ensayo a compresión probeta cilíndrica . . . . .	19
3.4. Ensayo a tracción probeta cilíndrica . . . . .	20
3.5. Curva granulometrica . . . . .	21
3.6. Montaje ensayo tracción barras . . . . .	22
3.7. Fibra utilizada . . . . .	23
3.8. Armadura Muro 1 . . . . .	24
3.9. Armadura Muro 2 . . . . .	24
3.10. Armadura Muro 3 . . . . .	25
3.11. Moldaje . . . . .	26

3.12. Hormigonado . . . . .	28
3.13. Forma final del hormigonado . . . . .	28
3.14. Mal hormigonado borde muro 2 . . . . .	30
3.15. Fundación antes de la reparación . . . . .	30
3.16. Reparación con Sikarep . . . . .	31
3.17. Montaje ensayo . . . . .	32
3.18. Montaje ensayo . . . . .	33
3.19. LVDT utilizados . . . . .	34
3.20. Posición LVDT . . . . .	35
3.21. LVDT en las fundaciones . . . . .	36
3.22. Equipo de adquisición de dato . . . . .	37
3.23. Fotogrametría . . . . .	38
4.1. Histéresis Muro 1 . . . . .	41
4.2. Primeras grietas lado cordillera . . . . .	42
4.3. Drift 0,5 % . . . . .	42
4.4. Drift 1 % . . . . .	43
4.5. Drift 2 % . . . . .	44
4.6. Muro drift 3,2 % . . . . .	45
4.7. Desprendimiento lado costa en drift 3,2 % . . . . .	46
4.8. Drift 4 % . . . . .	47
4.9. Pandeo barras lado costa . . . . .	47
4.10. Corte estribo lado cordillera . . . . .	48
4.11. Histéresis Muro 2 . . . . .	49
4.12. Desplazamiento corte al 2,5 % . . . . .	50
4.13. Desplazamiento de flexión al 2,5 % . . . . .	50
4.14. Desplazamiento total al 2,5 % . . . . .	51
4.15. Comparación deriva 2.5 % . . . . .	52



4.16. Muro drift 0,75 % . . . . .	53
4.17. Muro drift 1 % lado cordillera . . . . .	53
4.18. Muro drift 1 % lado costa . . . . .	54
4.19. Muro drift 1,25 % . . . . .	55
4.20. Muro drift 1,6 % . . . . .	56
4.21. Muro drift 2 % . . . . .	57
4.22. Muro drift 2,5 % . . . . .	57
4.23. Muro drift 3,2 % . . . . .	58
4.24. Descascara-miento de lado costa en el ciclo 2 . . . . .	59
4.25. Muro 2 al finalizar el ensayo . . . . .	59
4.26. Lado cordillera al finalizar . . . . .	60
4.27. Cortes de barra después de retirar hormigón . . . . .	61
4.28. Daño por taladro en barra de 12 mm de lado sur . . . . .	62
4.29. Histéresis muro 3 . . . . .	63
4.30. Primera fisura muro 3 . . . . .	64
4.31. Muro drift 0,4 % lado cordillera . . . . .	65
4.32. Muro drift 0,4 % lado costa . . . . .	66
4.33. Muro drift 0,75 % . . . . .	67
4.34. Muro drift 2 % lado costa . . . . .	68
4.35. Muro drift 2 % lado cordillera . . . . .	69
4.36. Muro drift 2,5 % lado costa . . . . .	70
4.37. Muro 3 al terminar el ensayo . . . . .	71
4.38. Secante de los muros 1, 2 y 3 . . . . .	73
4.39. Secante muro 2 ambos lados . . . . .	73
4.40. Energía disipada de cara muro . . . . .	74
4.41. Envoltente muro 1 2 y 3 . . . . .	75
4.42. Comparación muro 1 y 2 . . . . .	76

4.43. Comparación muro 1 y 3 . . . . .	77
4.44. Comparación muro 3 y muro sin fibra y sin confinamiento . . . . .	78
4.45. Comparación muro 2 y muro con fibra sin confinamiento . . . . .	78
1. Diseño armadura muro 1 y 2 . . . . .	83
2. Diseño muro 3 . . . . .	84

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El hormigón es uno de los materiales mas utilizados en el mundo de la construcción y es conocido por ser frágil ante fallas a tracción, por lo cual este se utiliza con una armadura de acero que le aporta mayor ductilidad y resistencia. El acero es uno de los materiales que mayor costos implica en la construcción de elementos estructurales, tanto en el costo de este mismo como el de personal especializado para el doblado de barras de acero, por lo que disminuir los costos de este material resulta fundamental. Ya que el hormigón tiene una alta fragilidad junto con una baja resistencia a la tracción y capacidades de deformación por tracción, tal desempeño insatisfactorio se puede mejorar con la adición de fibras en la mezcla .

El hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC) ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a su rendimiento superior. Sus principales ventajas incluyen el impedimento en la propagación de macrofisuras, la prevención del crecimiento de microfisuras a nivel macroscópico, la mejora de la ductilidad y la resistencia residual después de la formación de la primera fisura y la alta tenacidad [1]. Los resultados indican que la adición de diferentes contenidos y longitudes de fibras de acero con proporciones crecientes de agua a cemento provocan un cambio significativo en las propiedades mecánicas del hormigón, con un aumento de alrededor del 10-25 % en la resistencia a la compresión y alrededor del 31-47 % en la resistencia a la tracción directa.[2] Para el caso de acero Dramix 3D 65/3, que es el a utilizar en esta memoria, a flexión en vigas se llega a aumentos en la resistencia de hasta el 40 % con relación al hormigón sin fibras y se mantienen las tensiones residuales aceptables. En cuanto a la capacidad de deformación en tracción y compresión, para probetas, la cuantía de 0.5 % de fibras de acero no sirve para dar mucha mayor ductilidad al hormigón mientras que la cuantía del 1 % de fibra aumenta la ductilidad.[3] Por lo que conocer la mejora que se producirá al utilizarse en muros es esperable y resulta llamativo conocer el comportamiento de este.

En efecto ambas fibras mejoran el comportamiento del hormigón en flexión y resistencia para probetas y vigas pero los estudios donde se utilizan en muros son escasos y en Chile

los muros se utilizan en la mayoría de los edificios habitacionales, donde estas estructuras de hormigón armado utilizan sus muros como elementos resistentes a las fuerzas laterales y gravitacionales. Sabemos que Chile es un país sísmico por lo cual los muros deben soportar grandes cargas cíclicas, por lo cual mejorar su comportamiento bajo este fenómeno resulta altamente importante, además sabemos por antecedentes de estudios anteriores que muros con material de fibrocemento exhiben un excelente comportamiento de pseudo endurecimiento por deformación en tensión y alta ductilidad a la tracción[4]

Los muros de hormigón armado son elementos estructurales ampliamente utilizados en la construcción de edificaciones, proporcionando resistencia a fuerzas laterales y gravitacionales. Tradicionalmente, el refuerzo de estos muros se ha realizado mediante barras de acero dispuestas longitudinal y transversalmente para mejorar su resistencia y ductilidad ante cargas sísmicas y otras sollicitaciones. Sin embargo, en las últimas décadas, ha surgido un interés creciente en el uso de fibras de acero como refuerzo adicional en el hormigón. Estas fibras, al ser dispersadas homogéneamente en la matriz de hormigón, pueden mejorar significativamente sus propiedades mecánicas y su comportamiento estructural. Por lo tanto, se propone analizar una estructura de muro escalado a una proporción de 1:3 de los muros reales, que simule las condiciones de sismos mediante ensayos cíclicos.

El objetivo es evaluar el impacto y la mejora del uso de fibras en este escenario específico analizando su ductilidad y resistencia según la cantidad de fibra metálica y armadura de la probeta de muro de hormigón. A través de este enfoque experimental, se construyen 3 probetas de muro de mismas dimensiones, una con confinamiento y hormigón tradicional la segunda con confinamiento y hormigón con fibra al 0.8% y la tercera sin confinamiento ni armadura vertical y horizontal reemplazando de manera volumétrica esta armadura por fibra al 0.79%. La investigación pretende aportar al entendimiento sobre el impacto que las fibras de acero pueden tener en el comportamiento estructural de los muros de hormigón. Se busca determinar si estas fibras podrían funcionar como una alternativa o un complemento apropiado al detallamiento de borde y la armadura en ciertas circunstancias. Lo obtenido en estos ensayos entrega nuevas ideas para mejorar el diseño y la construcción de estructuras en Chile.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Principal**

El objetivo principal de esta memoria es comparar el comportamiento mecánico de muros escalados de hormigón armado con fibras de acero Dramix 3D 65/35 y hormigón armado tradicional ante cargas cíclicas.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir 3 muros escalados de hormigón armado con refuerzo tradicional, fibra de acero y reemplazo de armadura por fibra de acero.

- Estudiar la respuesta del elemento de hormigón reforzado con fibras, su impacto en la ductilidad y la capacidad de deformación.
- Identificar la variación del comportamiento del hormigón armado convencional con el hormigón con fibra de acero y al reemplazar armadura por fibra en el muro.

### 1.3. Alcances

Este trabajo de título consiste en diseñar, construir y ensayar 3 muros de hormigón armado. Estos muros tendrán todas las mismas dimensiones por lo cual el moldaje será el mismo así como el sistema de fundaciones la diferencia entre ellos será que el primero es de hormigón con armadura tradicional y detallamiento de borde, el segundo es idéntico, misma armadura, añadiendo fibra de acero y el tercero se modificó la armadura por la cantidad volumétrica de acero que se sacó en la zona del muro. Estos muros serán ensayados ante cargas cíclicas.

Todo este trabajo se desarrolló en el laboratorio Arturo Arias, ubicado en Plaza Ercilla 833 en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas ubicada en la comuna de Santiago, Chile donde se realizaron los trabajos de construcción y ensayos de las probetas.

### 1.4. Estructura de la memoria

Para llevar a cabo esta memoria y poder desarrollar los muros escalados se contará con algunos pasos principales que se darán a conocer a continuación:

- Marco teórico: Realizar una recopilación de los items más importantes para llevar a cabo los cálculos, diseño y análisis de los muros.
- Cálculo y Diseño Muro: Llevar a cabo los cálculos preliminares para conocer la cantidad de armadura de confinamiento a utilizar y sus dimensiones, cumpliendo con el espaciamiento mínimo de pandeo y la cantidad de cuantía transversal, se realiza un diseño del muro considerando las medidas utilizadas anteriormente por nuestros compañeros y el mismo tamaño de barra para la armadura, calculando así la cantidad de estribos, es decir, el tamaño de la barra a utilizar como su espaciamiento en los bordes del muro.
- Construcción moldajes y armadura: Construcción de los moldajes de los muros, confección de la armadura de los 3 muros, cortando y doblando la enfierradura para el posterior armado.
- Hormigonado muros: hormigonar los muros con la betonera, siguiendo el orden de primero el muro de hormigón con armadura tradicional y para cuando este esté montado empezar el hormigonado del segundo y así sucesivamente.
- Montaje y ensayo: Realizar el montaje del muro y el pos-tensando, calibrando los lvdt, que son sensores capaces de medir desplazamientos, para su posterior ensayo. El ensayo

se desarrolla en el laboratorio de idiem que se encuentra al lado del departamento de eléctrica en la fcm, ensayando muros en posición vertical y sometidos a una carga horizontal cíclica.

- Análisis y resultados: Obtención de datos entregados por los ensayos y su análisis para realizar las curvas de ductilidad y deformación del muro y así hacer las comparaciones de como se comporta según cada configuración de muro.
- Comentarios y conclusiones: En este capítulo se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos, también se proporcionan consideraciones y mejoras para futuros diseños.

Estos pasos guiarán el proceso de investigación y desarrollo de los muros escalados, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento estructural de los materiales y su aplicación en la práctica.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

A continuación, se presentan los principales conceptos y teorías relevantes para comprender la aplicación de fibras de acero en muros de hormigón:

### 2.1. Propiedades del Hormigón

El hormigón es el material que resulta de la mezcla de arena, grava, agua, cemento, eventualmente aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas, que al endurecer, adquiere resistencia. El hormigón se clasifica según su resistencia especificada a compresión a los 28 días, el  $f_c'$  es determinado por probetas cilíndricas.[5] Su resistencia a la compresión, similar a la de las piedras naturales, es alta lo que lo hace apropiado para elementos sometidos principalmente a compresión, tales como columnas o arcos. Asimismo, de nuevo como en las piedras naturales, el concreto es un material relativamente frágil, con una baja resistencia a la tensión comparada con la resistencia a la compresión. Esto impide su utilización económica en elementos estructurales sometidos a tensión ya sea en toda su sección (como el caso de elementos de amarre) o sobre parte de sus secciones transversales (como en vigas u otros elementos sometidos a flexión).[6]

Los aditivos se definen como materiales distintos de los agregados, cemento y agua. El concreto que contiene arena y grava naturales o agregados de roca triturada, que generalmente pesa alrededor de  $2400 \text{ kg/m}^3$  ( $4000 \text{ lb/yd}^3$ ), se llama concreto de peso normal. Las resistencias a la tracción y a la flexión del hormigón son del orden del 10 y el 15 por ciento de la resistencia a la compresión. La razón de una diferencia tan grande entre la resistencia a la tracción y a la compresión se atribuye a la micro estructura heterogénea y compleja del hormigón.[10]

Los factores que hacen del concreto un material de construcción universal son tan evidentes que ha sido utilizado de diversas maneras por miles de años; probablemente se comenzó a usar en el antiguo Egipto. Uno de estos factores consiste en la facilidad con la cual, mientras se encuentra en estado plástico, puede depositarse y llenar las formaletas y moldes de cualquier forma. Su alta resistencia al fuego y al clima son ventajas evidentes. La mayor parte de

los materiales constitutivos, con la excepción del cemento y los aditivos, están disponibles a bajo costo, localmente o muy cerca del sitio de construcción. Su resistencia a la compresión, es alta lo que lo hace apropiado para elementos sometidos principalmente a compresión. [6]

Debido a que el concreto se utiliza principalmente en compresión, resulta de interés fundamental su curva esfuerzo-deformación unitaria a la compresión. Esta curva se obtiene mediante mediciones apropiadas de la deformación unitaria en ensayos de cilindros o en la zona de compresión de vigas. La figura 2.1 muestra un conjunto típico de estas curvas para concreto de densidad normal y de 28 días de edad, obtenidas a partir de ensayos de compresión uniaxial realizados con velocidades de carga normales y moderadas. La figura muestra las curvas correspondientes para concretos livianos con densidades de 1600 kg/m<sup>3</sup>. Todas las curvas tienen características similares. Todas tienen una porción inicial relativamente elástica y lineal en la cual el esfuerzo y la deformación unitaria son proporcionales, luego comienzan a inclinarse hacia la horizontal alcanzando el esfuerzo máximo, o sea la resistencia a la compresión para una deformación unitaria que varía aproximadamente entre 0.002 a 0.003, para concretos de densidad normal, donde los mayores valores en cada caso corresponden a las mayores resistencias.[6]

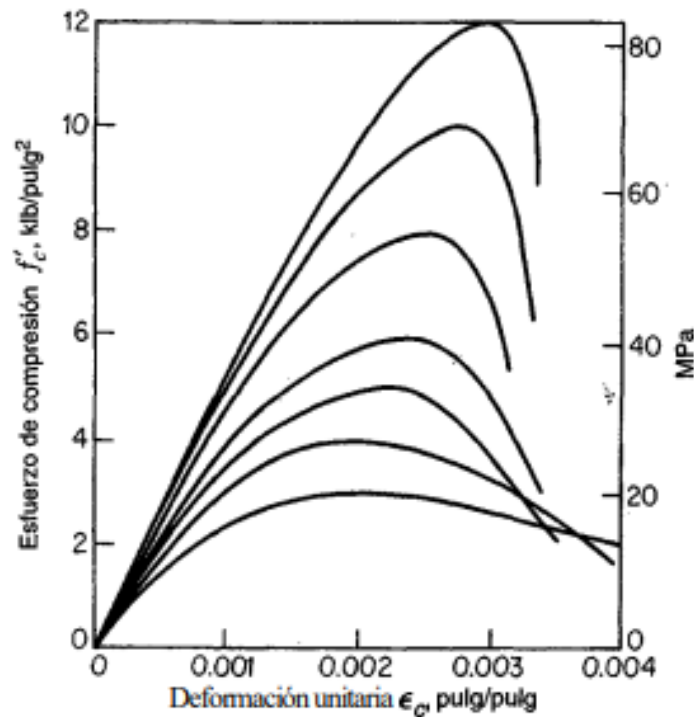


Figura 2.1: Esfuerzo de compresión Hormigón [6]

La respuesta del hormigón a la tensión aplicada depende no sólo del tipo de tensión sino también de cómo una combinación de varios factores afecta la porosidad de los diferentes componentes estructurales del hormigón. Los factores incluyen propiedades y proporciones de los materiales que componen la mezcla de concreto, grado de compactación, y condiciones de curado. Desde el punto de vista de la fuerza, la relación entre la relación agua-cemento y la



porosidad es sin duda el factor más importante, factor porque, independientemente de otros factores, afecta la porosidad tanto del matriz de mortero de cemento y la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso. [10]

## 2.2. Antecedentes del uso de fibras

El empleo de fibras como refuerzo en hormigón ha sido objeto de investigación y desarrollo durante varias décadas. Estas fibras, que pueden ser de diferentes materiales como acero, polímeros, vidrio, carbono, entre otros, se incorporan al hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas y de comportamiento estructural. La incorporación de fibras en el hormigón comenzó en la década de 1960, con el objetivo de mejorar su resistencia a la tracción y su capacidad de controlar la fisuración. Desde entonces, se han desarrollado diversas tecnologías y métodos para la producción y aplicación de hormigón reforzado con fibras. Existen diferentes tipos de fibras utilizadas en el hormigón, cada una con características específicas que afectan su desempeño en términos de resistencia, ductilidad, durabilidad y otras propiedades relevantes. Algunos ejemplos incluyen fibras de acero, fibras de polipropileno, fibras de vidrio y fibras de carbono. El uso de fibras en el hormigón puede proporcionar una serie de beneficios, como una mayor resistencia a la tracción y flexión, una mejor resistencia a la fatiga y al impacto, una mayor resistencia al agrietamiento y una mejor capacidad de controlar la propagación de grietas.

En los últimos años, la primera patente para el hormigón reforzado con fibras fue presentada en California (1874) por A. Bernard. A una patente de H. Alfsen en Francia (1918) le siguió GC Martin en California (1927) para los tubos fabricados con hormigón armado con fibras de acero. H. Etheridge (1931) patentó un proceso relacionado con el uso de anillos de acero para abordar el anclaje de fibras de acero. Sin embargo, las aplicaciones generalizadas del material en la práctica rutinaria de la construcción se vieron obstaculizadas por sus altos costos, malas instalaciones de prueba y, lo más importante, el rápido desarrollo paralelo del uso de hormigón armado con barras y cables de acero. No fue hasta los experimentos de James Romualdi (1962) que surgió una comprensión más clara de las propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero.[12]

La construcción de edificios de gran altura, puentes de gran envergadura y estructuras en alta mar ha hecho que las fibras de acero sean importantes para mejorar las propiedades del hormigón, como la resistencia, la tenacidad, la capacidad de absorción de energía y la durabilidad. La adición de fibras de acero, en el hormigón de alto rendimiento (HPC) puede mejorar el comportamiento frágil y la capacidad de absorción de energía. El hormigón armado con fibra juega un papel importante en el desarrollo de la tecnología moderna del hormigón, que representa una nueva clase de hormigón para la construcción. En los últimos años, se llevó a cabo una amplia investigación para explorar el uso de fibra de acero en la producción de hormigón reforzado con fibra de alta resistencia (HSFRC). [2]

Las curvas típicas de tensión deformación del hormigón reforzado con fibra en compresión muestran un aumento marginal en la tensión máxima, un aumento apreciable en la deformación en la tensión máxima y una tenacidad sustancialmente mayor, donde la tenacidad es una medida de la capacidad de absorber energía. Sin embargo, existen pocos estudios

sobre el comportamiento del hormigón de alta resistencia reforzado con fibra de acero bajo compresión.[13]

Tanto el PVA como el hormigón reforzado con fibra de acero que se aplican en los muros de corte RC están convencidos de que tienen un efecto positivo en la mejora de la capacidad sísmica. Sin embargo, la decisión de la estrategia de refuerzo de fibra y la estimación de la capacidad de carga aún no están claras. Debido a la consideración económica, el hormigón reforzado con fibra se usa generalmente en la zona crítica del elemento estructural. Para los muros de corte esbeltos, es necesario revelar el efecto de refuerzo sobre la capacidad sísmica entre el PVA y el hormigón armado con fibra de acero en la zona plástica y la columna de borde, para así tomar una decisión optimizada en el diseño estructural.[11]

## 2.3. Fibra de Acero

Las fibras de acero cuando se introdujeron como idea experimental en el hormigón no siempre fueron como en la actualidad, ya que en la actualidad hay una industria que comercializa y moderniza las fibras, para optimizar su rendimiento, entre ellas está Dramix de la empresa Bekaert, que introdujo las fibras de acero en 1970 con 1 gancho, las que se conocen como fibras Dramix 3D, luego la misma empresa desarrolla las fibras Dramix 4D y 5D que tienen 1.5 y 2 ganchos respectivamente aumentando su capacidad de soportar carga y ductilidad variando el modo de falla de las fibras, pero todas generando ductilidad en el hormigón, estas fibras son las que se muestran en la figura 2.2. Los haces pegados de las fibras evitan la formación de bolas de fibras durante el mezclado y garantizan que las fibras se distribuyan uniformemente por toda la mezcla de hormigón. Para la mayoría de las aplicaciones básicas, las relaciones L/D más bajas de la serie 3D están disponibles en forma suelta y Embalaje. Dramix está disponible en diferentes tipos de envases, desde sacos de 10 kg y 20 kg hasta para uso a gran escala. [7]



Figura 2.2: Tipos de fibra de acero [7]

La ductilidad y la resistencia posterior a la fisura del hormigón con fibras de acero están determinadas por muchos aspectos diferentes, incluida la composición del hormigón, la longitud de las fibras y la relación aspecto l/d. Un factor importante del rendimiento es también

una combinación equilibrada de diseño del anclaje, resistencia y ductilidad del alambre en la figura 2.3 podemos ver la resistencia a tracción de la fibra. La tracción de una fibra tiene que estar perfectamente alineada con su sistema de anclaje y su diámetro. Dramix 3D, 4D y 5D están diseñados para aprovechar al máximo ya que la resistencia del cable de acero debe aumentar paralelamente a la resistencia de su anclaje. [7]

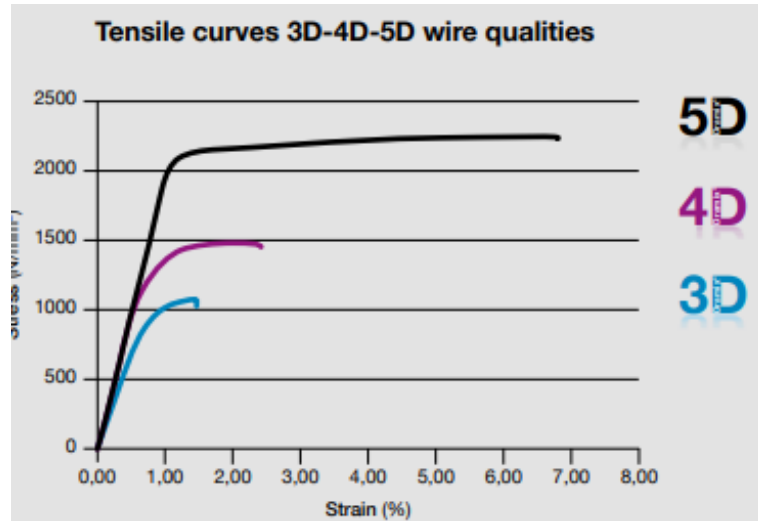


Figura 2.3: Curvas tensión deformación fibra [7]

Las propiedades mecánicas de la fibra a utilizar son las que se muestran en la tabla 2.1 la fibra 3d Combinando alto rendimiento, durabilidad y facilidad de uso, 3D le proporciona una alternativa rentable y que ahorra tiempo al refuerzo de hormigón tradicional. Los extremos en forma de gancho de dramix 3d De hecho, generan la reconocida ductilidad y resistencia post-fisura del concreto.

Tabla 2.1: Propiedades mecánicas fibra de acero [7]

Largo [mm]	Diámetro [mm]	Resistencia atracción [MPa]	Módulo de Young [Mpa]	Densidad [kg/m3]	Deformación máxima a tracción
35	0,66	1.345	200.000	7.850	0.8 %

## 2.4. Comportamiento mecánico de hormigón con fibras

Las propiedades mecánicas de HPC mejoran significativamente con la adición de fibras de acero con diferentes propiedades. Con base en la investigación experimental presentada La resistencia a la compresión del hormigón con un contenido de fibra de acero de 0,5 a 1,5% aumentó ligeramente en no más del 10% para el hormigón de alta resistencia ( $w/c = 0,25$ ), mientras que para el hormigón de resistencia moderadamente alta el aumento de la resistencia a la compresión alcanzó el 25%. La mejora en la resistencia a la compresión del hormigón con la mayor resistencia de la matriz con la adición de fibras fue menor que la del hormigón con menor resistencia de la matriz. La resistencia a la tracción directa del

hormigón aumenta hasta alrededor del 12% para el caso de un contenido de fibra del 0,5% y la longitud de 50 mm en hormigón de alta resistencia ( $w/c = 0,25$ ). Dicho incremento es mayor y alcanza el 47% en el caso del 1,5% de fibra y la longitud de 60 mm en el hormigón de menor resistencia ( $a/c = 0,45$ ). Concreto con fibras de mayor relación de aspecto han mostrado una mejora más pronunciada en la resistencia a la tracción que el hormigón con menor relación de aspecto. La resistencia a la flexión del hormigón con un contenido de fibra de acero de 0,5% a 1,5% ha aumentado de 100% a 150% para fibra con una relación de aspecto más pequeña. El hormigón con 1,5% de fibras de acero y con una relación de aspecto superior a 80 ha mostrado un aumento en la resistencia a la flexión que puede alcanzar alrededor del 150% en el hormigón de alta resistencia ( $w/c = 0,25$ ).[2]

En los estudios de Felipe concha se utilizó la tenacidad como el parámetro para medir la ductilidad ya que representa la degradación de la resistencia según el desplazamiento, y en el caso de las viguetas, muchos ensayos alcanzaron deformaciones tan grandes que los ensayos tuvieron que detenerse antes de lograr un 80% de la degradación de la carga que es cuando la máquina universal estaba configurada para detenerse, entonces esto genera un sesgo a la hora de estandarizar un criterio para medir la ductilidad y por esto se utilizó la tenacidad hasta los 3.02 [mm] que es donde se ubica la cuarta tensión residual las fibras no afectan en el tramo elástico, ya que todas las viguetas, para ambas mezclas y todas las cuantías, encuentran su cr alrededor de los 0.25[mm], también se puede ver que tanto las cuantías del 0.5% y 1% en ambas mezclas tienen una ductilidad aceptable, sin embargo, con la cuantía del 0.5% existe una degradación de la resistencia mucho mayor que con la del 1%. Nuevamente, en el caso de la mezcla 1 se ve afectada la resistencia por la inclusión de fibra.[3]

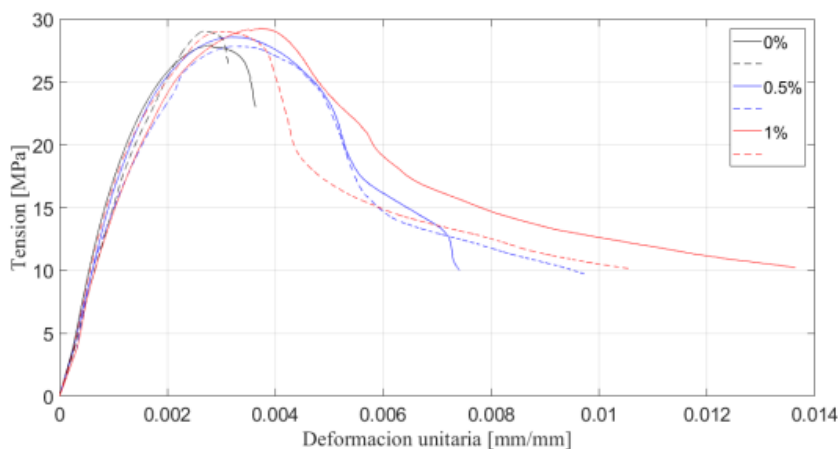


Figura 2.4: Ensayo compresión [3]

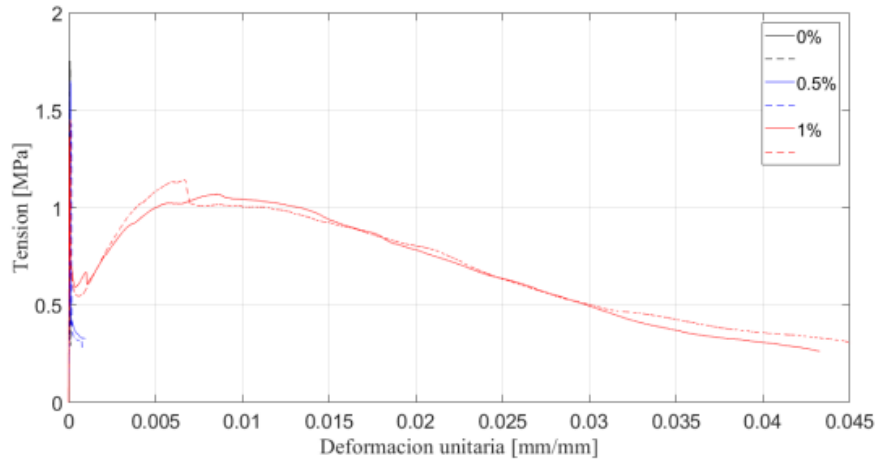


Figura 4.2: Ensayo de tracción directa para la mezcla 2 (Árido fino).

Figura 2.5: Ensayo tracción [3]

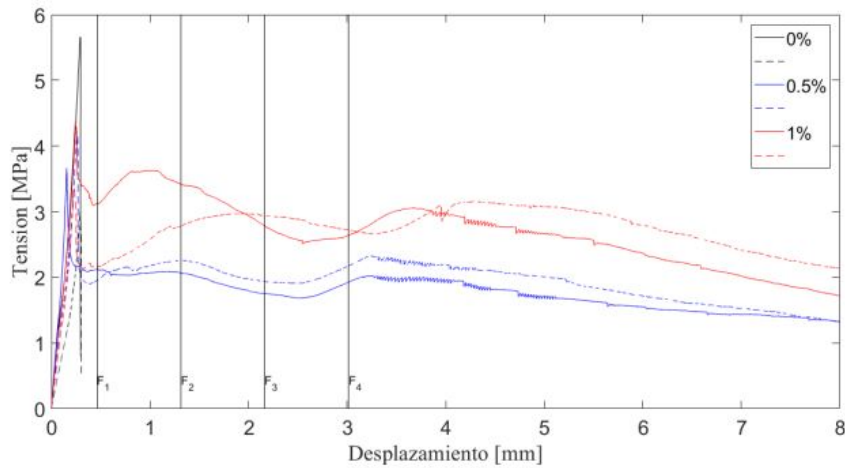


Figura 2.6: Ensayo flexión vigueta [3]

En las figuras 2.4 se observa la casi nula influencia que tiene una cuantía del 0.5% de fibras de acero comparada con una cuantía del 1%. En la figura 2.5 la deformación unitaria de fisura está alrededor de 0.003 [mm/mm], por lo que se presume que las fibras no influyen en el tramo elástico, también el efecto de la cuantía de 0.5% no es comparable con la de 1% siendo la última más influyente en la ductilidad por lo que cuantías de fibra cercanos al 1% muestran mejores resultados.[3]

## 2.5. Respuesta a carga y deformación de muros

Los muros mal detallados y/o con compresión controlada, es decir, muros que carecen de refuerzo transversal estrechamente espaciado para sostener una zona de compresión estable y asegurar la dispersión de la plasticidad al confinar el hormigón central y suprimir el pandeo de las barras de refuerzo, exhiben un comportamiento deficiente .[13]

El refuerzo en los límites de los muros está sujeto a grandes variaciones de tensión y deformaciones de compresión cuando se somete a cargas sísmicas (cíclicas invertidas). Las deformaciones por compresión son grandes, especialmente para esfuerzos axiales grandes y para límites de alma de muros con secciones transversales en forma de T, lo que potencialmente conduce a una falla por compresión. Alternativamente, si el refuerzo está sujeto a grandes demandas de deformación por tracción (que exceden la fluencia), se abren grietas y, ante la carga inversa, el refuerzo debe resistir toda la compresión, lo que podría provocar una falla por pandeo. Como se señaló anteriormente, debido a una mayor variación en las demandas de tensión y deformación de compresión , el refuerzo longitudinal del límite del alma para muros con secciones transversales en forma de T es mucho más susceptible al pandeo que el refuerzo longitudinal del límite en muros con sección transversal rectangular.[9]

La importancia de los detalles de diseño adecuados y el refuerzo apropiado en los muros para garantizar su estabilidad y resistencia, especialmente en un entorno sísmico como el de Chile. La falta de estas consideraciones puede resultar en fallas catastróficas durante eventos sísmicos.[13]

Muros de corte con hormigón armado con fibra de PVA en ambas columnas de borde y zona plástica inferior, y los muros de corte con hormigón reforzado con fibra de acero en la zona plástica inferior exhiben una mejor tolerancia al daño sísmico, rigidez y capacidad de carga lateral. El hormigón reforzado con fibra de PVA obtuvo una tenacidad a la tensión superior a la del hormigón reforzado con fibra de acero. El hormigón armado con fibras de acero en las columnas de borde límite hace que las muestras alcancen una mayor rigidez inicial, mientras que la degradación de la rigidez lateral es más notable. Comparativamente, los muros de cortante de hormigón armado con fibra de PVA en la zona plástica inferior disminuyeron más gradualmente. Tanto los muros de cortante con PVA y hormigón armado con fibras de acero en las columnas de borde y zona plástica inferior se mejoran en la capacidad de disipación de energía en particular para el hormigón reforzado con fibra de acero. El hormigón reforzado con fibra de acero exhibió una capacidad de disipación de energía significativamente mejorada y aumentó constantemente hasta el procedimiento completo de carga. El hormigón reforzado con fibra de PVA es excelente en tenacidad a la tensión y el hormigón reforzado con fibra de acero es más eficiente en la capacidad de resistencia al corte en la figura 2.7 vemos los diagramas de distribución de grietas de probetas de muro en el estado último. [4]

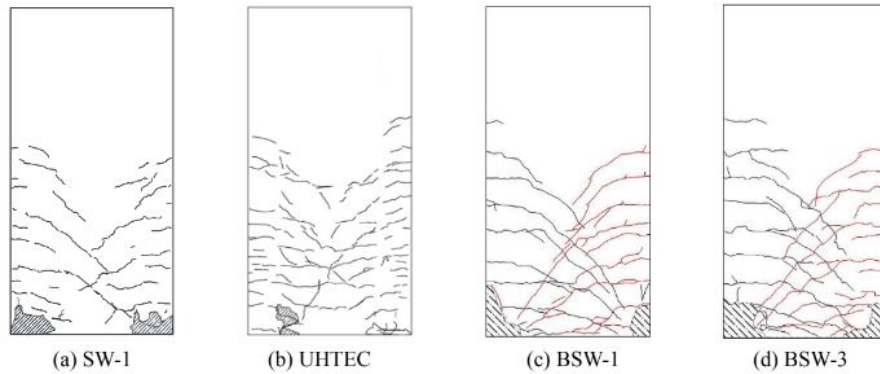


Figura 2.7: Diagramas de distribución de grietas de probetas en el estado último [4]

En la memoria de Francisco Rodo se hace el análisis de la comparación entre un muro sin fibra y sin confinamiento llamado muro de control y un muro de mismas características pero con fibra al 0.8%, donde se observa en la figura 2.8 que el Muro Control alcanza una resistencia máxima de 10 [tonf], mientras que el Muro Alternativo alcanza una resistencia máxima de 11,3 [tonf], siendo esta un 13% mayor a la del muro sin fibras. El Muro Control alcanza su resistencia máxima en el primer ciclo de la deriva 1,6%, mientras que el Muro Alternativo alcanzó su resistencia máxima en el primer ciclo de la deriva 3,2%. También la figura 2.9 La deriva máxima corresponde al desplazamiento de techo máximo alcanzado por el muro antes de que falle. Para el Muro Control esta deriva corresponde al 2% mientras que para el Muro Alternativo esta deriva corresponde al 4%. Esto indica que el aumento de ductilidad fue de un 200% a favor del muro con diseño alternativo.[15]

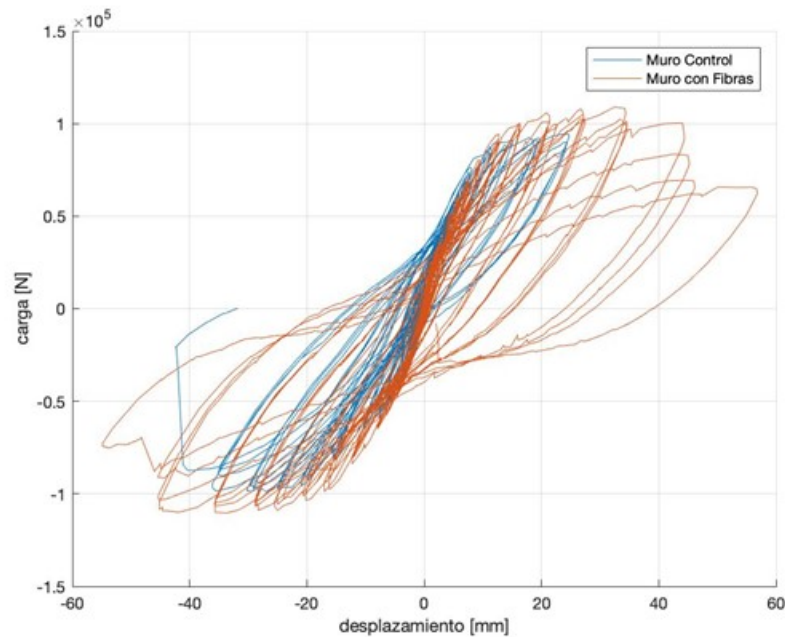


Figura 2.8: Histeresis muro con y sin fibra[15]

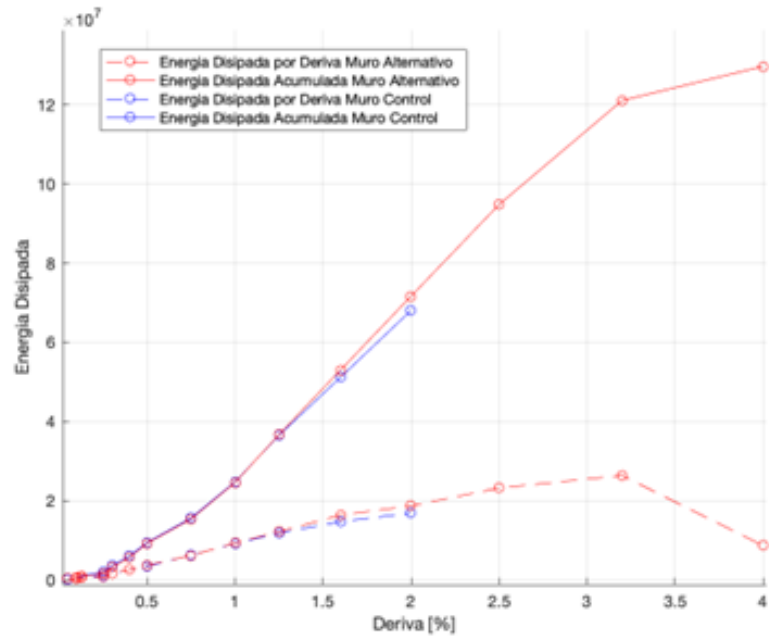


Figura 2.9: Energía muro Francisco Rodo [15]



# Capítulo 3

## Metodología experimental

En este capítulo, se proporciona una descripción detallada de los materiales e instrumentos empleados en todo el ciclo experimental tanto en la producción de mezclas de hormigón, así como en las fases de construcción de moldaje y ensayo de probetas. Además, se ofrece una explicación de los montajes necesarios para llevar a cabo cada uno de los ensayos establecidos.

### 3.1. Diseño y descripción Muros

En este capítulo, se detallarán tanto las propiedades geométricas como las mecánicas de cada probeta de ensayo, junto con las consideraciones que guiaron su diseño.

El proyecto se enfoca en la construcción de 3 probetas de muros de hormigón armado con medidas idénticas escalados 1:3. Una de ellas se construyó mediante técnicas convencionales, al que llamaremos muro 1, mientras que a las otras probetas se les incorporó fibra de acero, uno con un porcentaje de 0,8% de fibra aproximadamente al que llamaremos muro 2 y finalmente un muro en el que se reemplazan barras de la armadura por porcentaje de fibra que llamaremos muro 3. Los muros se diseñaron de manera que contempla la zona de fundación y de viga que se unen en forma de sándwich con otras placas de hormigón ya construidas, de las mismas dimensiones pero con espesor distinto. La zona de fundación tiene 0.7 [m] de altura, 1.2 [m] de ancho y 0.1 [m] de espesor y la zona de viga de transferencia tiene una altura de 0.3[m], 0.6 [m] de ancho y 0.1 [m] de espesor, este tiene la misma altura y espesor que la zona del muro. La zona de muro que es la más importante para este estudio tiene 1.15 [m] de altura 0.6 [m] de ancho y 0.1 [m] de espesor. Todas estas medidas se duplican en las 3 probetas de muro, en la tabla 3.1 podemos ver un resumen de las medidas de los 3 muros donde en **negrita** se destaca las medidas de la zona del muro.

Tabla 3.1: Medidas probetas muro

zona	altura [mm]	ancho [mm]	espesor [mm]
<b>muro</b>	<b>1150</b>	<b>600</b>	<b>100</b>
viga	300	600	100
fundación	700	1200	100

### 3.1.1. Diseño muro 1 y 2

Los muros tiene una altura total de 215 [cm] y todos contemplan las misma forma, pero 2 muros contemplan la misma armadura, esta consta de una doble malla de  $\phi 12$  y  $\phi 6$  para los bordes del muro y un  $\phi 6$  vertical en el centro del muro, los estribos fueron diseñados cumpliendo la norma al limite de  $6^*$ (diámetro barra) quedando con un espaciamento de 7 cm, para estribos de diámetro 4.2 mm obtenidos de una malla acma dúctil, estos se distribuyen a lo largo de todo el muro cada 7 cm excepto en donde posee la armadura vertical de  $\phi 6$  en forma de j de doble malla donde se dispone a colocar un gancho para completar la forma del estribo en esa zona, la forma de la armadura se puede ver en la figura 3.1.

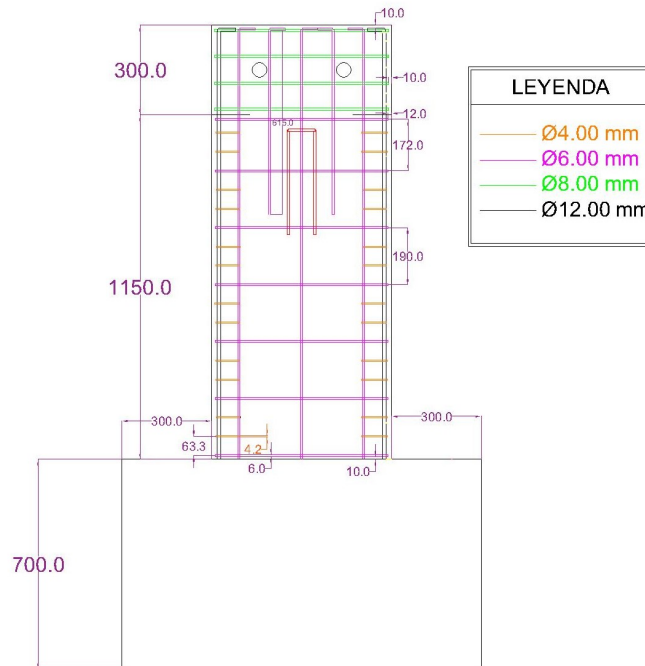


Figura 3.1: Diseño armadura original

### 3.1.2. Diseño muro 3

Este muro se obtiene a partir del cambio de la configuración de la armadura del muro 1 y 2, al agregar fibra se calculo la cuantía de esta en la zona del muro y se igualo con la cantidad de barras de acero que se sacan al agregar fibra, en este caso se reemplazo de forma volumétrica la cantidad de acero en la zona del muro sacando toda la armadura horizontal, las 10 barras phi 6 en forma horizontal y la armadura longitudinal en la zona del muro, que corresponde a las 2 barras phi 6 verticales en el centro del muro, así también se saco todos los estribos de los bordes del muro. La configuración final es la que se observa en la figura 3.2 quedando solo las barras phi 6 y 12 de los bordes del muro. Cabe destacar que solo se modifico la zona del muro ya que la zona de viga y fundación siguieron con su armadura original, en anexos podemos encontrar unas figuras mas detalladas de la armadura del muro. En la tabla 3.2 vemos un resumen de los datos mas importantes a tener en cuenta de los 3 muros.

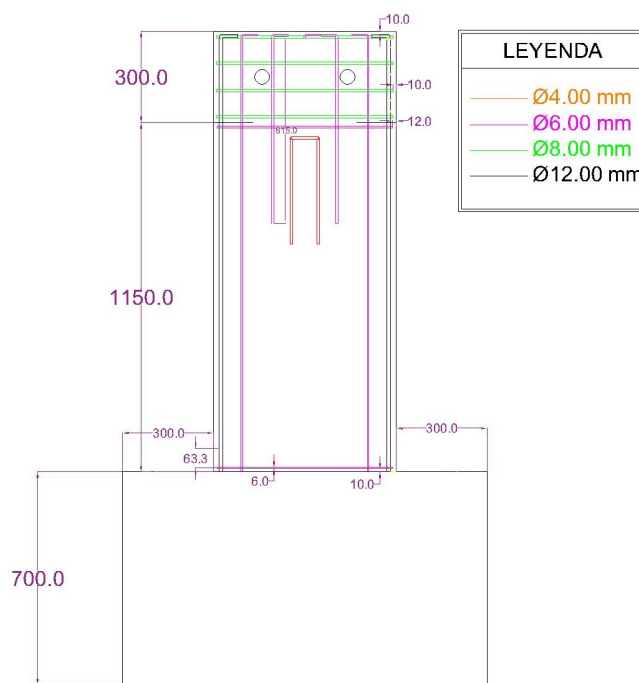


Figura 3.2: Diseño armadura reemplazo de acero

Tabla 3.2: Datos diferencias muros

muro	cuantía de fibra %	confinamiento	armadura horizontal	armadura vertical	relación agua cemento
1	-	si	si	si	3,17
2	0,8	si	si	si	3,41
3	0,79	no	no	no	3,62

## 3.2. Materiales

Aquí se detallan los materiales principales que se ocuparon en el proceso constructivo de las 3 probetas de muro para conocer con anterioridad sus propiedades mecánicas y trabajabilidad de estas.

### 3.2.1. Hormigón

El Hormigón que se utilizó es una pre-mezcla de áridos con cemento, este tiene el nombre comercial de Presec H-01 Fastcrete y contiene un acelerador de fraguado que permite el tránsito liviano prematuro a las 2 horas de aplicado el producto. Este según su ficha técnica tiene aproximadamente 30 N/mm<sup>2</sup> a 28 días en probeta cúbica.

#### Ensayo compresión cilindros de hormigón

Para conocer la resistencia a compresión del hormigón de cada tanda que se realizó en la betonera, se sacaron muestras en probetas cilíndricas de el hormigonado, estas probetas tienen 210 [mm] de altura y 105 [mm] de diámetro, están echas según la norma NCh 1017-2009 y la extracción de las muestras se realizó siguiendo las especificaciones detalladas en la norma NCh 171-2008. Los cilindros se ensayaron luego de 28 días de haber vaciado el hormigón o mas, así asegurándose de que estos ya se encuentran con su resistencia máxima.

En la Figura 3.3 se ve el montaje del ensayo de compresión, estos se ensayan en la maquina universal de la fcm y el procedimiento de ensayo se detalla a continuación:

- Preparación probetas: Cuando las probetas cilíndricas cumplen su tiempo de fraguado mínimo de 28 días se deben desmoldar del tubo de pvc, además para que al instalar en la maquina la probeta se ajusten bien, se deben rectificar ambos extremos de estas.
- Montaje: este se instala sobre la maquina universal de manera que quede nivelado y centrado incluyendo unos soportes para los lvdt's.
- Ensayo: El procedimiento de ensayo implica aplicar una tasa de deformación constante de 0,5 [mm/min] y se detiene cuando la probeta alcanza un 80 % de degradación de su resistencia máxima. También se emplean dos sensores LVDT en cada lado de la probeta que registran la deformación real de las probetas durante todo el ensayo y así tener información mas detallada de la deformación de la probeta en el tiempo.
- Resultados: En la Tabla 3.3 se presentan los valores de resistencia a compresión del hormigón obtenido de los ensayos de probetas cilíndricas ´para cada muro.



Figura 3.3: Ensayo a compresión probeta cilíndrica

Tabla 3.3: Resultados ensayo compresión cilindros de hormigón

Muro	fc [MPa]	fc prom [MPa]
1	22,9	23,3
	23,8	
2	27,5	26,6
	25,6	
3	25,3	25,9
	26,5	

### Ensayo tracción cilindros de hormigón

Para conocer la resistencia a tracción del hormigón en la zona del muro, se sacaron muestras en probetas cilíndricas de el hormigonado, estas probetas tienen las mismas características de las utilizadas en el ensayo a compresión. Los cilindros se ensayaron luego de 28 días de haber vaciado el hormigón o mas, así asegurándose de que estos ya se encuentran con su resistencia máxima.

En la Figura 3.4 se ve el montaje del ensayo de tracción, estos se ensayan en la maquina universal. El procedimiento de ensayo se detalla a continuación:

- Preparación probetas: Cuando las probetas cilíndricas cumplen su tiempo de fraguado mínimo de 28 días se deben desmoldar del tubo de pvc.
- Montaje: las probetas de hormigón se deben unir a unas placas de acero mediante Sikadur 32 y dejar secar mínimo un día antes de el ensayo, con las probetas ya unidas estas se atornillan a los extremos de la maquina universal y se les pegan los lvdt a las caras de la probeta.

- Ensayo: el ensayo consiste en aplicar una carga axial gradual y uniforme a la probeta cilíndrica mediante la máquina de universal. También se emplean dos sensores LVDT en cada lado de la probeta que registran la deformación real de las estas durante todo el ensayo y así tener información mas detallada de la deformación de la probeta en el tiempo.
- Resultados: En la Tabla 3.4 se presentan los valores de resistencia a tracción del hormigón obtenido de los ensayos de probetas cilíndricas.



Figura 3.4: Ensayo a tracción probeta cilíndrica

Tabla 3.4: Resultados ensayo a tracción

Muro	ft <sub>r</sub> [MPa]
1	1,32
2	1,05
3	1,93

### Granulometría pre-mezcla

Para realizar un muestreo preciso, es crucial mezclar todo el material disponible para garantizar que la muestra a estudiar sea lo más representativa posible. Posteriormente, se extraen 500 [g] de la muestra total y se someten a un proceso de tamizado utilizando tamices estandarizados de diferentes tamaños. Estos tamices están compuestos por un marco sólido con una malla montada, diseñados para separar áridos más grandes, y un paño de cedazo para separar los finos de la muestra. Los resultados de la granulometría se muestran en la tabla 3.5 y la forma de la curva en la figura 3.5.

Tabla 3.5: Granulometría pre-mezcla hormigón

diámetro	actual	% retenido	% que pasa
9,5	1,3	0,26	99,74
4,75	91,61	18,45	81,29
2,36	68,3	13,76	67,53
2	12,2	2,46	65,07
0,6	70,92	14,28	50,79
0,425	23,36	4,70	46,09
0,3	22,23	4,48	41,61
0,15	32,25	6,50	35,11
0,075	22,76	4,58	30,53
fondo	151,58	30,53	0
	<b>496,51</b>	<b>100,00</b>	

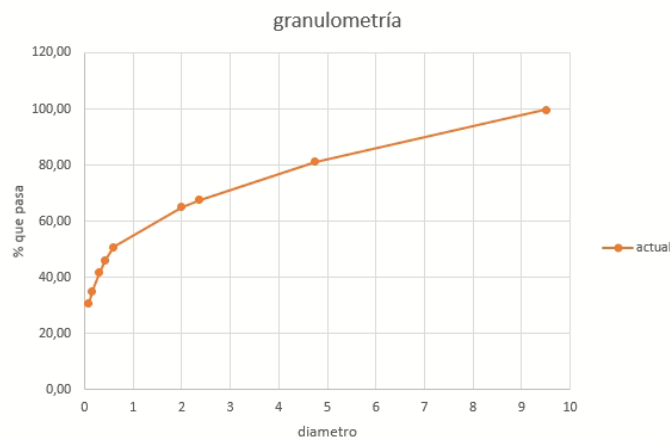


Figura 3.5: Curva granulométrica

### 3.2.2. Acero

Se utilizaron barras de phi 6, 8 y 12 para la armadura de los muros además los dos primeros muros contaban con estribos de confinamiento los cuales se construyeron con barras obtenidas de una malla acma electro soldada de phi 4.2.

#### Ensayo tracción acero

El ensayo de tracción en barras de acero es una prueba estándar utilizada para determinar las propiedades mecánicas del acero, especialmente su resistencia a la tracción y su capacidad de deformación antes de romperse. Este ensayo se realiza en la maquina universal de la FCFM. Se analizaron 2 muestras para cada diámetro de barra utilizada (diámetros 12, 8, 6, y 4.2 mm) Aquí se da una descripción general del procedimiento:

- Preparación de la muestra: Se toma una muestra de la barra de acero a ensayar esto quiere decir que se cortan aproximadamente 20 cm de la barra.
- Ensayo: La muestra se coloca en la máquina universal para el ensayo de tracción, donde se sujetará firmemente en ambos extremos. Esto permite aplicar una carga axial gradual y controlada a la muestra en la figura 3.6 se muestra la forma del ensayo.
- Registro de datos: Durante el ensayo, se registran continuamente la carga aplicada y la deformación de la muestra.
- Determinación de propiedades mecánicas: A partir de los datos obtenidos durante el ensayo, se pueden determinar varias propiedades mecánicas importantes del acero, como la resistencia a la tracción que es la que se muestra en la siguiente tabla 3.6 para cada una de los diámetros antes mencionados.

Tabla 3.6: Resultados ensayo a tracción en barras de acero

Diámetro	Fy [MPa]	Fy prom [MPa]
\phi 4.2	633	638
	643	
\phi 6	573	556,5
	540	
\phi 8	645	607,5
	570	
\phi 12	574	572
	570	



Figura 3.6: Montaje ensayo tracción barras



### 3.2.3. Fibra de acero

Se utilizó una fibra de acero 3d 65/35 que tiene, como dice su nombre, una esbeltez de 65 y un largo de 35 mm. Esta se utilizó en 2 de los muros con cuantías muy parecidas al primero con la armadura de confinamiento para el muro 1 se utilizó una cantidad fija de fibra por saco de pre-mezcla de 0.75 kg por lo que el porcentaje de fibra por tanda es distinto para cada una según la cantidad de agua que se ocupó. La densidad de fibra que se utiliza en ambos muros es muy similar y ronda en un 0.8% para que sea comparable entre los dos. En la figura 3.7 se muestra la fibra utilizada en ambos muros después de ser despegada en agua con la betonera lista para verter sobre la mezcla.



Figura 3.7: Fibra utilizada

## 3.3. Desarrollo constructivo

Ya con el diseño de las probetas listas y la compra de los materiales necesarios se comenzó con la construcción de los muros dividiendo el proceso en 3 etapas (enfierradura, moldaje y hormigonado) que se detallan a continuación. Todas las actividades se realizaron en el laboratorio de estructuras en la loza de reacción ubicada la fcfm con la indumentaria de seguridad adecuada para cada trabajo.

### 3.3.1. Enfierradura

El primer paso para empezar con la construcción de las armaduras es el cortado de barras, estas se realizan con esmeril para los diámetros 6, 8 y 12. Para el phi 4 se cortaron con un napoleón, estos se realizaron con todos los implementos de seguridad requeridos, careta pechera y guantes además de zapatos de seguridad y oberol. El segundo paso es el doblado de barras, las barras de 4 se doblaron en el laboratorio de sólidos de Mecesus en una dobladora pequeña, las barras del 6 y 8 se doblaron en una mesa especial para doblado y una machina y las barras del 12 se doblaron en una dobladora más grande especial.

Con todas las barras ya dobladas, se procedió con el armado de la armadura. En este

paso, se contrató personal especializado que, utilizando el plano de la estructura de cada muro, armó las tres mallas de acero. El resultado para el muro 1 se muestra en la figura 3.8. Esta armadura corresponde al con confinamiento. En la figura 3.9, se muestra el resultado para la armadura del muro 2, que es idéntica a la del muro 1. En cuanto al muro 3 que es la que se observa en la figura 3.10, cuyo confinamiento es inexistente, se le añadieron unos estribos en la zona central de los bordes del muro para evitar que la armadura perdiera su forma en este se extrajeron las barras verticales y horizontales del muro, correspondientes a las barras de diámetro 6 mm, quedando únicamente las barras verticales en los bordes del muro.



Figura 3.8: Armadura Muro 1



Figura 3.9: Armadura Muro 2



Figura 3.10: Armadura Muro 3

### 3.3.2. Moldaje

El moldaje se armó de manera horizontal, esto para que el hormigonado sea de igual manera horizontal imitando una piscina de hormigón, esto ya que el muro es de un espesor de solo 10 cm. El moldaje se construyo con un Tablero terciado de moldaje film estándar con 1,22 metros de ancho, 2,44 metros de largo y con 18 milímetros de espesor. Para realizar el moldaje se compraron 4 de estos tableros, donde uno se utilizo para confeccionar las paredes laterales, además como el tablero tiene 1.22 metro de ancho para rellenar 2 cm faltantes en la fundación se utilizo una plancha de terciado estructural de 9 mm de espesor en las laterales de la zona de fundación del muro, después se prosigue a realizar las perforaciones que son por donde pasan las barras que unen la viga y fundación con el muro y forma el sándwich, por lo cual se realizan 2 perforaciones de 42 mm de diámetro en la zona de viga y 4 en la zona de la fundación estas están posicionadas según las perforaciones que tienen las fundaciones y vigas ya construidas, en estas perforaciones se instalan tubos de pvc de diámetro 40 mm, para mantener su posición se pegan con silicona al moldaje, la forma final del moldaje se puede observar en la figura 3.11.



Figura 3.11: Moldaje

### 3.3.3. Hormigonado

El hormigonado se llevo a cabo de 2 formas distintas según la maquinaria que se tenía disponible, para el primer hormigonado se utilizo la betonera de idiem y con carretillas se llevo el hormigón hasta el moldaje ubicado en la losa de reacción y la segunda con una betonera distinta ubicada afuera del laboratorio. Para cada una de las probetas se utilizo una cantidad de agua ligeramente distinta dependiendo de la cantidad de sacos de hormigón que se mezclaban y la trabajabilidad de estas para proporcionar un mejor hormigonado, a pesar de estas diferencias el proceso de hormigonado fue similar y es la que se detalla a continuación:

- Preparación moldaje: Antes de comenzar el hormigonado se prepara el moldaje nivelándolo y aplicando silicona en todas las uniones de este, para evitar la perdida de hormigón por esas zonas, después se prosigue a aplicar desmoldante en todas sus caras, además se colocan topes hechos con barras de diámetro 8 mm para asegurar el recubrimiento.
- Preparación de fibra: según lo requiera el muro a construir se prepara la fibra para incluirla en la mezcla, donde la fibra se vierte en recipientes con agua, con su cantidad a utilizar ya medida, para eliminar el pegamento que los une en la misma betonera antes de empezar con el hormigonado se echa la fibra para separarlas, ya separada la

fibra se dispone en recipientes drenando el agua con pegamento y esta lista para utilizar en la mezcla.

- Carga de la betonera: Antes de comenzar se humedece la betonera para evitar que la mezcla se pegue en la superficie de esta, después se cargan los materiales en proporciones específicas, dependiendo de la mezcla de concreto requerida para cada tanda la relación agua/cemento utilizada. Se agregan primero los sacos de pre-mezcla seguidos de el agua.
- Mezcla en la betonera: Una vez que todos los materiales están en la betonera, se inicia el proceso de mezcla. La betonera gira sobre su eje, lo que permite que los materiales se mezclen de manera uniforme y se forme el concreto, durante este proceso se vierte la fibra de manera uniforme y proporcionada para evitar que se aglutine en algunos sectores.
- Control de la consistencia: Durante el proceso de mezcla, es importante controlar la consistencia del concreto. Si es necesario, se le agregar más agua para ajustar la mezcla para lograr la consistencia y trabajabilidad deseada .
- Descarga del concreto: Una vez que la mezcla alcanza la consistencia adecuada, se detiene la betonera y se procede a descargar el concreto en las carretillas estas se llevan a donde esta el moldaje y se vierten en el con palas.
- Colocación y vibrado del hormigón: Una vez que el concreto se ha descargado en el moldaje, se procede a utilizar el vibrador para distribuir mejor la mezcla ya cuando el moldaje este completamente lleno de hormigón se pasa por la superficie una regleta para nivelarla superficie y asegurar una distribución uniforme del material el resultado es como el que se observa en la figura 3.13.
- Curado del hormigón: ya con el hormigón listo en el moldaje, es importante permitir que cure adecuadamente. Esto implica mantener el concreto húmedo durante un período de 7 días esparciendo agua en su superficie, para asegurar su resistencia y durabilidad.





Figura 3.12: Hormigonado



Figura 3.13: Forma final del hormigonado

Para los 3 muros se ocuparon los mismos materiales (utilizando los saco de 25 kilos de premezcla) pero estos se hicieron en distintas tandas y se ocupo una cantidad de agua levemente distinta dependiendo de la trabajabilidad requerida en el momento del hormigonado, el muro 1 se hizo en 3 tandas siendo la segunda tanda la de la zona del muro, en la tabla 3.7 vemos la cantidad de materiales utilizados, el muro 2 se hizo de la misma forma que el muro 1 pero agregando fibra a la mezcla y en la ultima tanda se disminuyo de 6 a 3 saco ya que la primera vez sobro demasiada mezcla, la cantidad de material ocupada se observa en la tabla 3.8, el muro 3 se realizo en 4 tandas para trabajar mas rápido en menor cantidad de hormigón fresco agregando fibra a toda la mezcla, los resultados de cantidad de material ocupado se encuentran en la tabla 3.9.

Tabla 3.7: Materiales hormigonado muro1

Mezcla	Sacos Hormigón	Agua [kg]	A/saco
1	6	18,5	3,08
2	6	19	3,17
3	6	19,5	3,25

Tabla 3.8: Materiales hormigonado muro 2

Mezcla	Sacos Hormigón	Agua [kg]	Agua/saco	Fibra [kg]	Fibra/saco	Densidad
1	6	20,5	3,42	4,5	0,75	0,80 %
2	6	21,25	3,54	4,5	0,75	0,80 %
3	3	9,85	3,28	2,325	0,775	0,83 %

Tabla 3.9: Materiales hormigonado muro 3

Mezcla	Sacos Hormigón	Agua [kg]	A/saco	Fibra [kg]	F/saco	Densidad
1	4	14,15	3,54	3	0,75	0,80 %
2	4	14,6	3,65	3	0,75	0,79 %
3	4	14,6	3,65	3	0,75	0,79 %
4	4	14,6	3,65	3	0,75	0,79 %

### 3.3.4. Reparaciones

El muro 2 con borde de confinamiento y fibra tuvo algunos problemas de hormigonado por el uso de hormigón de secado rápido sumado al uso de la fibra acompañado de los estribos de los bordes del muro que dejaban un espacio de solo 7 cm entre ellos, estos disminuyeron el espacio en los bordes del muro, por lo que al desmoldar nos encontramos con zonas en las que no le había llegado hormigón, como se observa en la figura 3.14 por lo que se tuvo que realizar una mezcla del mismo hormigón con la misma dosificación y relación agua cemento utilizado en su hormigonado original sumándole un acelerador de fraguado para rellenar las zonas que no tenían hormigón, además para que este se uniera bien a al hormigón ya fraguado se uso

sika latex que es un aditivo a base de polímeros que mejora la adherencia entre un mortero fresco y uno endurecido, también mejora la trabajabilidad y la manejabilidad, permeabilidad y retracción de morteros.



Figura 3.14: Mal hormigonado borde muro 2

Ya al desmoldar la probeta de muro 2 completamente nos encontramos que en la zona de fundación se encontraba con una forma irregular lo que disminuirá la zona de contacto con las fundaciones prefabricadas existentes que funcionan por roce entre el muro y las fundaciones prefabricadas por lo que se opto por aplicar una capa de plasticem de no mas de 2 mm hasta alizar toda esta zona de la fundación del muro y nivelar lo mas posible, este es el que se observa en la figura 3.15.



Figura 3.15: Fundación antes de la reparación

Al posicionar el muro 2 en el montaje este presentaba algunas imperfecciones en la zona de la viga y de la fundación por lo cual se reparo con Sikarep, que es un mortero predosificado de alta calidad, de un componente, listo para usar, con características tixotrópicas que le permiten ser usado sobre cabeza sin escurrir, basado en aglomerantes cementicios, fibras sintéticas, micro sílice, aditivos especiales y agregados inertes de granulometría controlada y según su ficha técnica tiene una resistencia a compresión de 35 mpa en el día 1, este se utilizo para mejorar la superficie de los muros después del hormigonado en las zonas en que



no eran estudiadas como la fundación y la viga para al momento de montar mejorar y alisar esa zonas, quedando como resultado final como se ve en la figura 3.16 para la fundación.



Figura 3.16: Reparación con Sikarep

### 3.4. Montaje experimental

El ensayo implica someter cada probeta a una carga lateral cíclica en el borde superior del muro por desplazamiento de techo, a través de un actuador hidráulico, el cual está anclado a un muro de reacción por el lado costa y al muro a ensayar por el lado cordillera. Este actuador se controla mediante el desplazamiento y una celda de carga de la cual obtiene el valor de la carga necesaria para alcanzar en cada desplazamiento. La probeta de muro posee una carga de compresión axial constante suministrada por dos gatos hidráulicos montados en el sistema de carga axial.

Para aplicar estas cargas a la probeta, es necesario anclar el muro a la losa del laboratorio. Esto se logra mediante un sistema de post-tensado y anclaje que utiliza barras de acero, coplas y placas para unir las partes prefabricadas de la fundación con el muro. Las 4 barras de acero pasan por entre la fundación y muro uniéndolas como un sándwich, estas son sometidas a un pos-tensado de 15 toneladas en cada barra. Luego, se realiza el pos-tensado de la barra vertical que une las dos fundaciones con el muro mediante una placa, con una carga de 12 toneladas. Al completar el pos-tensado vertical, se verifica nuevamente la horizontal para asegurar que no se haya perdido carga. Una vez finalizado el pos-tensado, se procede a posicionar la viga, que se une al muro formando un sándwich al igual que la fundación pero esta vez solo con dos barras de acero (la viga no necesita pos-tensado). Luego, se monta la carga axial sobre la viga, levantando una viga de acero a través de la cual se pasan dos barras de acero en sus extremos. Se colocan gatos en cada barra y en una de ellas la celda de carga. Posteriormente, se coloca el marco para asegurar la carga axial, uniendo el marco con la viga de acero. Finalmente, se coloca el actuador en el muro.

La posición final del montaje del muro es la que se observa en las figuras 3.17 3.18 y en

el cual se le agregan unas barras al marco en ambos lados que sirven como arrastramiento lateral para evitar que el muro se mueva en esa dirección y se colocan unas cuñas en los bordes inferiores de la fundación del muro para disminuir su giro y desplazamiento horizontal estas cuñas se ubicaron para el muro 1 individuales para cada fundación y para el muro 2 y 3 como una placa mas grande que une las dos fundaciones prefabricadas y la fundación del muro.



Figura 3.17: Montaje ensayo



Figura 3.18: Montaje ensayo

### 3.5. Instrumentación

Para examinar el comportamiento general del muro, se han utilizado instrumentos de medición de desplazamientos LVDT (Transformadores Diferenciales de Variación Lineal) que permiten medir desplazamientos lineales en ubicaciones específicas y así obtener la curva carga desplazamiento del ensayo estos se observan en la figura 3.19.

Para el primer ensayo de muro de hormigón tradicional se utilizaron 19 sensores LVDT, 8 sensores en la cara del muro, uno principal para conocer el movimiento horizontal del muro en su techo y otro en su base para corregir por deslizamiento en la horizontal y dos

de manera vertical en la fundación del muro; los restantes se ubicaron en el sistema de fundaciones reciclado para conocer sus movimientos y uno adicional que se utilizó solo en el primer ensayo para conocer su movimiento horizontal en la base en el lado opuesto por lo que en el muro 2 se utilizaron 18 lvdt.



Figura 3.19: LVDT utilizados

El tercer muro correspondiente al de reemplazo de armadura por fibra no lleva sensores en la cara del muro por lo que solo cuenta con 10 lvdts el principal y en la viga y en las fundaciones del muro y las prefabricadas. A continuación se detallan los lvdts utilizados en los muros según corresponde en cada ensayo:

#### En la cara del muro:

- **Vertical desde el hilo sin fin a la fundación:** Estos 2 sensores van desde un hilo sin fin en el borde del muro hasta una placa pegada a la cara del muro a 1 cm aproximadamente de la fundación que son los de color rojo en la figura 3.20.
- **Vertical entre los hilos sin fin:** Estos sensores van desde el hilo sin fin inferior hacia arriba hasta llegar al hilo sin fin superior, se encuentran ubicados en el lado costa y cordillera de la cara sur del muro, en la figura 3.20 son los que se ven en color azul.
- **Vertical desde el hilo sin fin a la viga:** Estos sensores van desde el hilo sin fin superior a la viga, se encuentran ubicados en el lado costa y cordillera de la cara sur del muro en la figura 3.20 son los que se ven en color verde.
- **Diagonales:** Estos sensores se colocaron entre los hilos sin fin en diagonal, estos son utilizados para medir el desplazamiento de corte del muro y se pueden ver en la figura 3.20 en color rosado.

#### En fundación y viga:

- **Sensor principal:** se encuentra situado en la viga del muro en el centro de este en línea con el actuador, este sensor es el encargado de entregar el desplazamiento de techo del muro, en la figura 3.20 es el que se ve en color negro.
- **Vertical fundación:** para registrar la rotación de las fundaciones respecto del muro se dispusieron 4 sensores verticales, en la figura 3.21 son los que se ven en color naranja.



- **Vertical muro:** Para corregir el desplazamiento de techo del muro se dispusieron 2 sensores en forma vertical en la base de la fundación del muro uno en lado cordillera y otro en lado costa, en la figura 3.21 son los que se ven en color amarillo.
- **Horizontales fundaciones:** Estos LVDT se encargan de mostrar el deslizamiento de la fundación y se dispusieron 2 uno en cada fundación del lado cordillera en la figura 3.21 son los que se ven en color morado.
- **Horizontal muro:** Para conocer el deslizamiento del muro y después corregir su desplazamiento de techo se dispuso un LVDT en la fundación del muro de manera horizontal en la figura 3.21 son los que se ven en color café.
- **LVDT Actuador:** Se trata de un sensor horizontal situado en el pistón del actuador. Su función no es medir las deformaciones del muro, sino registrar el desplazamiento lateral del pistón. Este sensor puede utilizarse como un control secundario del desplazamiento de techo, en la figura 3.20 es el que se ve en color celeste.



Figura 3.20: Posición LVDT



Figura 3.21: LVDT en las fundaciones

### 3.6. Ensayo

El ensayo, como se ha mencionado previamente, adopta un carácter cíclico, el cual está dirigido por el desplazamiento principalmente, registrado por el LVDT principal situado en la viga del muro, en la línea de posicionamiento del actuador hidráulico. Durante el proceso de ensayo, se registra el valor del desplazamiento mediante el computador del sistema de adquisición y se ajusta el funcionamiento del actuador con el fin de alcanzar el desplazamiento máximo requerido, tal como es medido por el LVDT mencionado. A continuación en la tabla 3.10, se detallan los niveles de deriva utilizados, así como el desplazamiento correspondiente.

Tabla 3.10: Protocolo de ensayo

numero	Drift	Desplazamiento [mm]
1	0,10 %	1,36
2	0,15 %	2,04
3	0,20 %	2,72
4	0,30 %	4,08
5	0,40 %	5,44
6	0,50 %	6,80
7	0,75 %	10,20
8	1,00 %	13,60
9	1,25 %	17,00
10	1,60 %	21,76
11	2,00 %	27,20
12	2,50 %	34,00
13	3,20 %	43,52
14	4,00 %	54,40

### 3.7. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos, se empleó el chasis NI cDAQ-9188XT de National Instruments junto con los módulos de adquisición de datos NI9205 (para la lectura de voltaje) y NI9237 (para la lectura de la celda de carga). La conexión entre la caja de conexión y el módulo NI9205 se realizó mediante una extensión DB378, mientras que la energía necesaria se suministró utilizando una fuente de alimentación específica, el modelo NIPS-15.

Las señales capturadas se transmitieron al computador principal mediante un conector RJ45 y se procesaron utilizando el software LabVIEW. La configuración del equipo de adquisición de datos es el que se observa en la figura 3.22, las cuales se almacenaron en un archivo de texto.

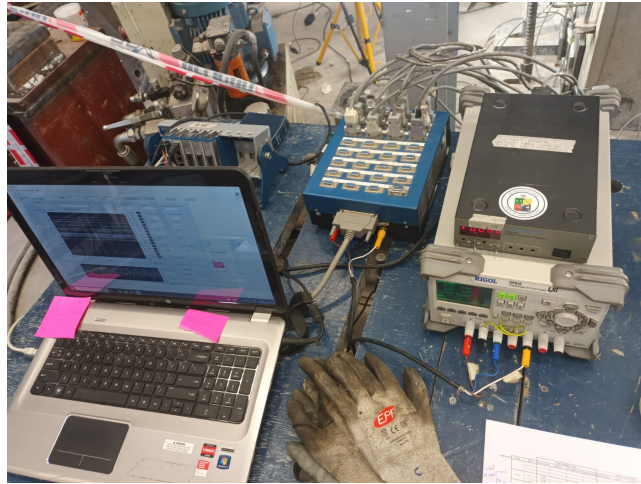


Figura 3.22: Equipo de adquisición de dato

### 3.8. Fotogrametría

Otro sistema utilizado para adquirir los datos relacionados con el ensayo es la fotogrametría. Para este propósito, se pinta una de las caras del muro, la cara opuesta a la que tiene instalados los LVDT, con puntos de diferentes tamaños, dispuestos de forma aleatoria, sin seguir ningún patrón o guía preestablecidos para el pintado las cámaras van sacando fotos según el desplazamiento del muro en cada drift para mostrar el movimiento del muro en todo el ensayo, para esto se ocupan 5 cámaras una global que muestra la cara del muro, 2 laterales para cada borde y 2 locales que muestran la mitad inferior del muro. En la figura 3.23 vemos la forma y posición de las cámaras para la fotogrametría donde la cámara mas grande corresponde a la global.



Figura 3.23: Fotogrametría



# Capítulo 4

## Resultados y Análisis

En este capítulo, se presentan los resultados experimentales obtenidos para cada muro y para el experimento en su conjunto, utilizando la metodología de fundaciones reutilizables ya probada y con buenos resultados por (Gumera S., Rodo F. y Cifuentes B. 2023). Se lleva a cabo un análisis detallado de los registros recolectados mediante los sensores, realizando correcciones precisas para considerar posibles imprecisiones asociadas al montaje, como el deslizamiento y la rotación del muro, con respecto a sus fundaciones durante el ensayo. Es crucial señalar que los 3 muros fueron construidos bajo condiciones ambientales idénticas y con geometrías iguales para así poder hacer comparaciones entre ellos.

Para obtener el desplazamiento de techo real, es importante considerar la componente de desplazamiento horizontal que resulta de la rotación del muro con respecto a la fundación. Además, es necesario descontar el deslizamiento en la dirección de aplicación de la carga. La relación descrita en la ecuación se emplea para ajustar el desplazamiento de techo por giro y deslizamiento.

$$\Delta Corregido = \Delta superior - \Delta inferior - (\Delta rot_{der} - \Delta rot_{izq}) \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (4.1)$$

Donde  $\Delta superior$  corresponde a los datos del lvdt superior que entrega el desplazamiento de techo real  $\Delta inferior$  corresponde a los datos del lvdt inferior horizontal del lado cordillera para corregir por deslizamiento,  $\Delta rot_{der}$  y  $\Delta rot_{izq}$  corresponde a los lvdt verticales del muro para corregir por , $\Delta h$  y  $\Delta l$  corresponden a la distancia entre el lvdt superior e inferior y entre los lvdt verticales de la fundación del muro respectivamente.

## 4.1. Respuesta sistema de fundaciones

En esta sección se abordarán los resultados derivados del uso de fundaciones reutilizables, los antecedentes demuestran que el sistema es efectivo, ya que fue probado por el grupo anterior y no tuvo inconvenientes, además se observaron desplazamientos pequeños respecto al movimiento del muro y las fundaciones con la losa de reacción. También se verificó que el pos-tensado de las barras horizontales Fundación-Muro y verticales fundación-loza se realizó con la tensión adecuada, ya que las fundaciones funcionan por fricción y presentaron un deslizamiento mínimo con respecto al muro. Estos resultados se muestran en la tabla 4.1 donde se ven los desplazamientos máximos de la fundación y muro en cada probeta. Podemos observar que el muro 1 tiene los valores mas altos esto debido a que en este se usaron cuñas individuales para cada fundación y para el muro 2 y 3 las cuñas que se utilizaron cambiaron a unas que abarcaban las 2 fundaciones y el muro lo que disminuyo el desplazamiento y rotación de las fundaciones y muro lo cual las hace mas eficientes.

Tabla 4.1: Resultados sistema de fundaciones

Muro	fundación horizontal [mm]	fundación vertical [mm]	muro vertical [mm]	muro horizontal [mm]
1	6	2	1,86	3,6
2	1,4	1	1,5	0,6
3	0,5	1,1	1	1,2

## 4.2. Respuesta global muro 1

El Muro 1 corresponde al construido con hormigón tradicional y confinamiento, soportando una carga axial constante de 16 tonf real. Se realizó un ensayo controlando la carga hasta el tercer drift de 0,2%. Para el primer drift, se controló con una carga de 3,5 tonf; para el segundo, con 4,5 tonf; y para el tercero, con 5,5 tonf. A partir del cuarto drift de 0,3%, se controló por desplazamiento. Al finalizar el ensayo, con los datos de los sensores, se obtuvo la Figura 4.1, que muestra la curva de histéresis de carga-desplazamiento obtenida mediante el registro de la deriva del techo corregida con la ecuación 4.1 del sensor superior en el muro y la celda de carga del actuador horizontal. En esta figura, se observa la simetría obtenida entre ambos lados, alcanzando un desplazamiento de techo corregido de 55,28 mm, lo que corresponde a un desplazamiento del 4% para una carga máxima de 10,6 tonf en el desplazamiento del 3,2%. A partir de este desplazamiento, comienza la degradación de la resistencia. Además, se puede observar cómo el muro falla en el lado positivo, correspondiente al lado inclinación costa.

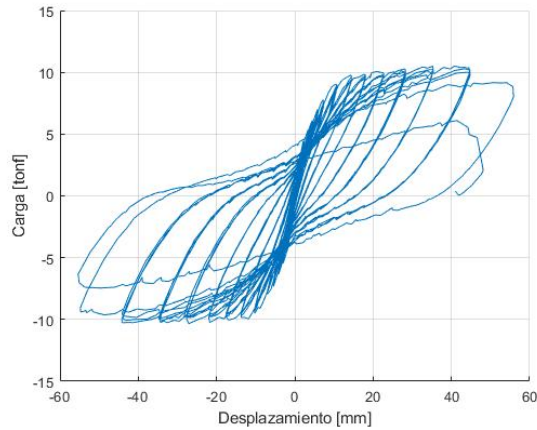


Figura 4.1: Histéresis Muro 1

### 4.3. Evolución de daño

En el primer drift de 0,1 % y un desplazamiento teórico de 1,36 mm se controló con una carga de 3,5 tonf y llegando a un desplazamiento real corregido de 1,4 mm aproximadamente en cada ciclo, para este desplazamiento de techo no se observan grietas en todos los ciclos. En el segundo drift de 0,15 % y un desplazamiento teórico de 2,04 mm se controló con una carga de 4,5 tonf y llegando a un desplazamiento real corregido de 2 mm aproximadamente en cada ciclo, para este desplazamiento de techo no se observan grietas en todos los ciclos.

El desarrollo de grieta se empieza a observar cuando aparece la primera grieta en el lado costa del muro, cuando se encontraba en el peak inclinado hacia el lado cordillera, al empezar el tercer ciclo de drift 0,2 %, en este momento se encontraba controlado por carga llegando a 5,5 tonf para un desplazamiento teórico de 2,72 mm y un desplazamiento corregido de 2,8 mm. Para el lado cordillera del muro la grieta tarda más en observarse, la primera grieta ocurre en el peak para el cuarto drift deriva de un 0,3 % en el segundo ciclo, en ese momento se encontraba controlado por carga llegando hasta 6,12 tonf y un desplazamiento corregido de 4,2 mm para un desplazamiento teórico de 4,08 mm, todas estas grietas son casi imperceptibles a la vista se aprecian en las fotos de la cámara local del muro en la figura 4.2 se observa la primera grieta en rojo del lado cordillera que se ubica en la parte inferior del muro y en su borde.

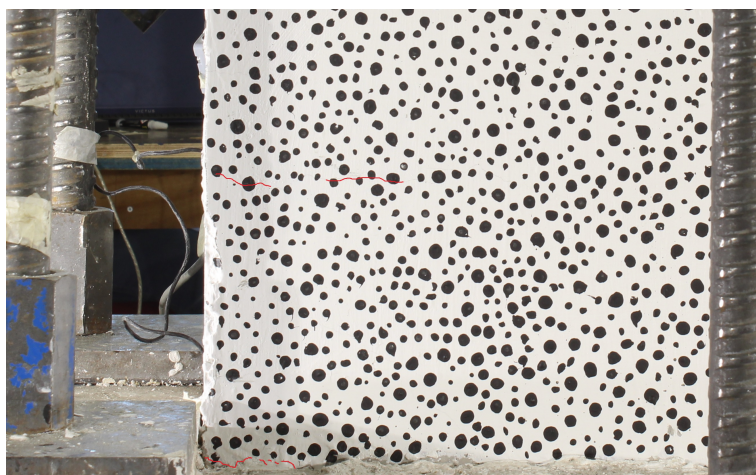


Figura 4.2: Primeras grietas lado cordillera

En el quinto drift para un desplazamiento de techo de un 0,4% controlando por desplazamiento teórico de 5,44 mm. llegando a una carga de 7,3 tonf las grietas se hacen un poco mas visibles y se agregan una pequeñas grietas en la base del muro para cada lado en su peak. Para el sexto drift con un desplazamiento de techo de un 0,5% controlando por desplazamiento teórico de 6,8 mm. llegando a una carga de 7,8 tonf, ya las grietas son visibles para ambos lados del muro en los peaks como se observa en la figura 4.3 para el peak cordillera con las grietas en el lado costa, donde vemos como la grietas se extienden desde los lados del muro hacia su base.

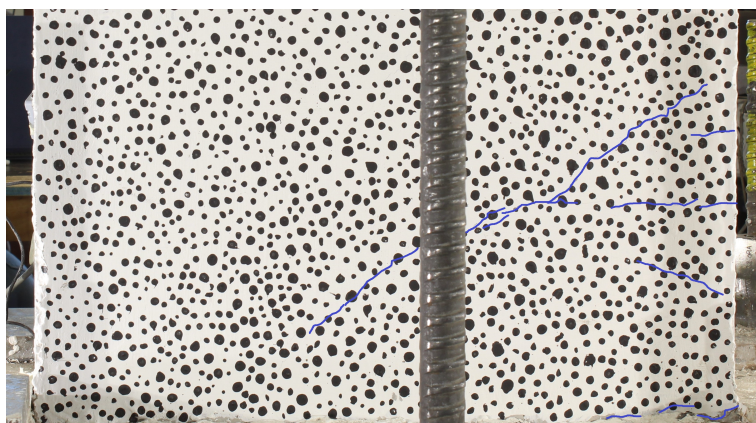


Figura 4.3: Drift 0,5%

Para el séptimo drift para un desplazamiento de techo de 0,75% controlando por desplazamiento de 10,2 mm llegando a una carga de 9,2 tonf, ya hay mas grietas en la zona del muro que van desde los bordes en diagonal hacia la base, además de una grieta considerable en la base del muro. Estas grietas se hacen mas notorias para el siguiente drift de 1% y se empiezan a notar en los bordes del muro como se observa en la figura 4.4 para el lado costa con peak en el lado cordillera esa figura corresponde a una foto local del muro por lo que no muestra el muro completo.

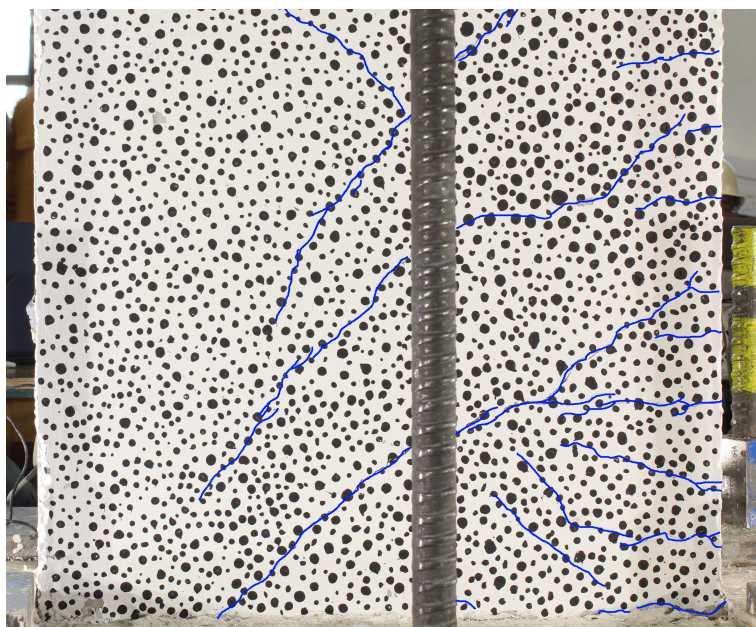


Figura 4.4: Drift 1 %

En el noveno drift de 1,25 % controlando por desplazamiento con 17 mm de desplazamiento de techo llegando hasta 10 tonf la grietas se hacen mas notorias y van avanzando aparecen nuevas grietas en los bordes del muro. Para los siguientes drift las grietas aumentaron su tamaño. Es ya en el Tercer ciclo del drift 2 % para una deformación 27,2 corregida controlada por desplazamiento llegando hasta una carga de 10,39 tonf donde las grietas para el lado costa son mas notorias y se ve su forma mas definida, han aparecido otras grietas mas pequeñas en la parte superior del muro y en los bordes la foto corresponde al muro en su totalidad.



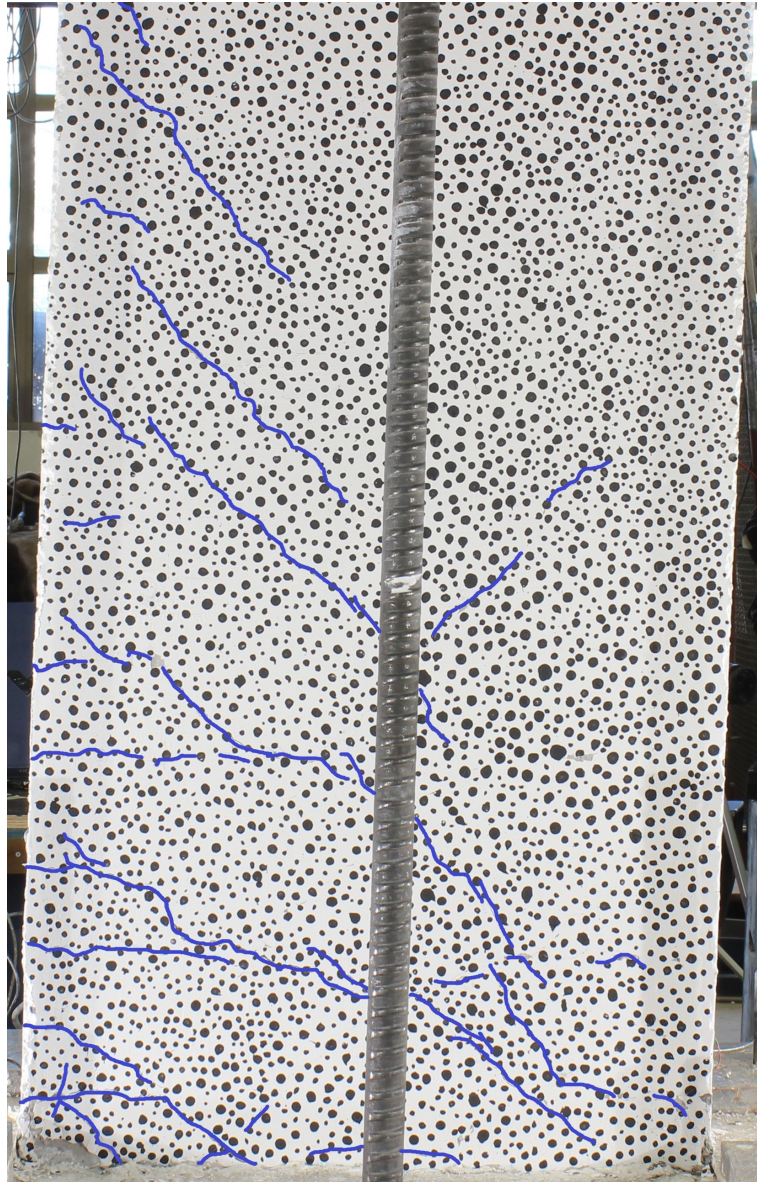


Figura 4.5: Drift 2 %

Para el ciclo del 2,5 % ya las grietas son totalmente visible tanto en la cara de muro como para sus bordes, en este punto esta controlado por desplazamiento 34 mm llegando a una carga de 10,5 tonf. Para el ciclo del drift 3,2 % se encuentra controlado por desplazamiento a 43,52 mm llegando a una carga de 10,62 tonf la mayor carga que soporto este muro, en la imagen se observa el drift 3,2 % 4.6 en el primer ciclo, aquí en el segundo ciclo se realiza un gran desprendimiento de hormigón por una falla en compresión en el borde costa del muro, que es el que se observa en la imagen de la figura 4.7 el que deja expuesto las barras de diámetro 12 y un estribo.

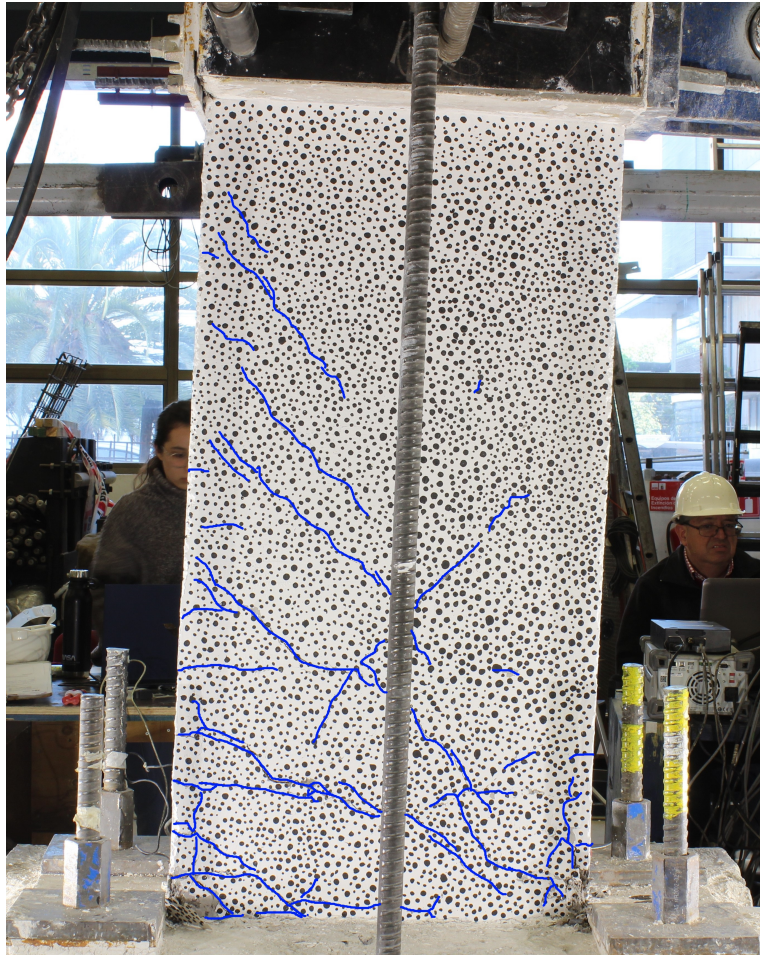


Figura 4.6: Muro drift 3,2%



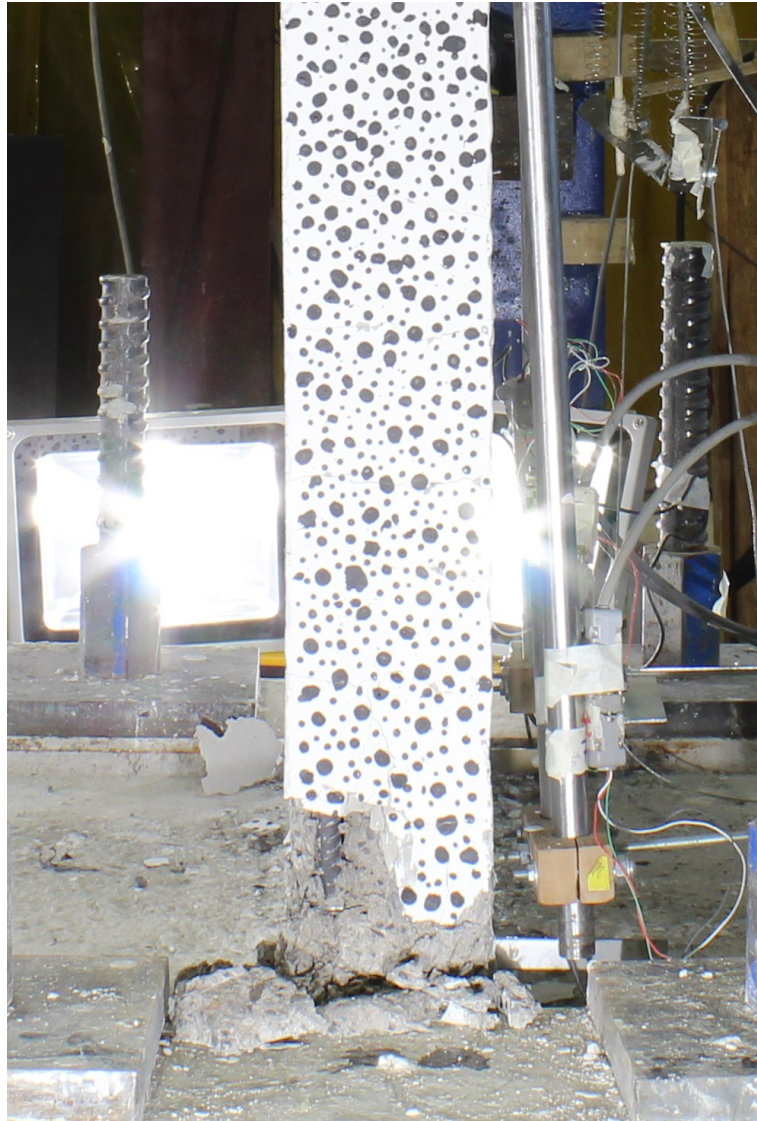


Figura 4.7: Desprendimiento lado costa en drift 3,2%

El ensayo se desarrollo hasta el drift 4% donde este perdió carga en el segundo ciclo en la inclinación hacia el lado costa, llegando hasta un desplazamiento de 47 mm cuando en el ciclo anterior para el mismo drift se llego hasta 54.89 mm, el muro presento diversas grietas que son las que se observan en la figura 4.8 también en las fotos de las laterales podemos observar el pandeo de las barras del 12 que se encontraban en los bordes del muro y como se cortaron los estribos de esa sección viendo como las barras llegaron a su capacidad ya que estos fluyeron, además podemos ver como en los primeros 30 cm desde la fundación del muro se concentra el daño y como en los bordes del muro fallo por compresión.





Figura 4.8: Drift 4%

Para el drift numero 14 de 4% de deriva de techo la carga disminuyo a 9,51 en el primer ciclo ya que en los ciclo anteriores era de mas de 10, ya para el segundo ciclo para el lado cordillera bajo a 7 tonf, ya para el lado costa la carga cayo considerablemente llegando hasta 47 mm de desplazamiento de deriva de techo, en este punto el ensayo se detuvo. Las barras se pandearon en ambos lados como se observa en la figura 4.9, también en la figura 4.10 donde se observa el estribo cortado en el lado cordillera.



Figura 4.9: Pandeo barras lado costa



Figura 4.10: Corte estribo lado cordillera

#### 4.4. Respuesta global muro 2

El muro 2 corresponde a el que incluye confinamiento y fibra a un 0,8%, este muro se ensayo por carga hasta el drift de 0,2% y después por desplazamiento, con una carga axial real constante de 16 toneladas. La Figura 4.1 muestra la curva carga-desplazamiento obtenida con el registro de deriva de techo corregida con la ecuación 4.1 del sensor superior en el muro y la celda de carga del actuador horizontal. En esta se observa la asimetría obtenida entre ambos lados por los cortes de barra anticipado en el lado cordillera del muro cuando el peak estaba en el lado costa, llegando a un desplazamiento de techo corregido de 54,5 mm que corresponde a un drift del 4% para una carga máxima de 11 tonf en el drift 2,5% que es el momento antes del corte de la primera barra de diámetro 12 mm, desde ese punto comienza a caer la carga del lado cordillera y esta caída aumenta con cada corte de barra posterior, haciendo que la degradación de la carga y la curva sea diferente para cada lado ya que cae un 27% en el primer corte de barra desde un 11 a 8 tonf comparado con el peak lado cordillera que en ese mismo punto la carga cae un 1,8%, ya para el segundo corte de barra de diámetro 12 mm la carga vuelve a caer desde 8 tonf a 5,7 tonf y para el otro lado solo cae de 9,1 a 8,7 tonf, el ultimo corte de barra se produce en el drift del 4% y es una barra de 6 mm de diámetro que hace que caiga la carga de 5,7 tonf a 4,8 tonf en el siguiente ciclo se termina el ensayo.

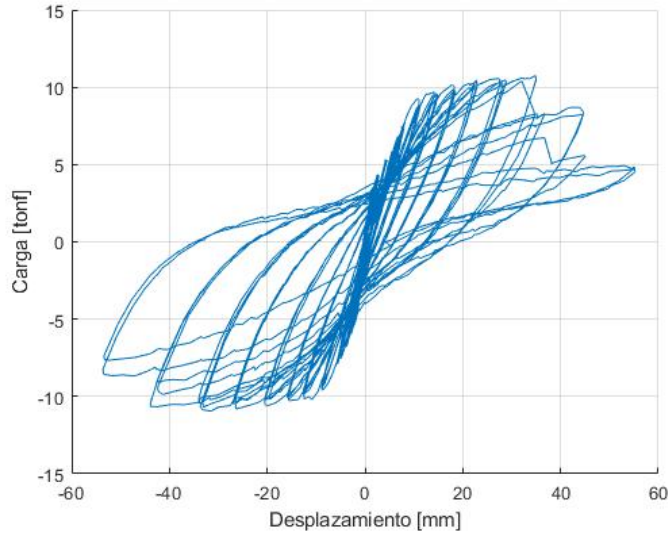


Figura 4.11: Histéresis Muro 2

## 4.5. Flexión y corte muro 2

Para el cálculo de las deformaciones de corte y flexión se utilizan los resultados de los sensores y las ecuaciones propuestas por el estudio Massone y Wallace (2004). En la figura 4.13 podemos observar el desplazamiento en flexión calculado con la ecuación 4.2 donde  $\alpha$  es 0,5,  $V1$  y  $V2$  son los sensores verticales,  $h1$  es la altura al primer piso y  $l$  la distancia horizontal entre medidores, para las deformaciones a flexión se ocupan los registros obtenidos de los sensores verticales ubicados en los bordes del muro, para ello se integran los sensores en la altura. Los resultados se muestran para el muro 2 con confinamiento y fibra el cual nos muestra que el muro la mayor parte de su desplazamiento es por flexión llegando hasta 15 mm comparado con los resultados del desplazamiento de corte que son los que se observan la figura 4.12 el cual se calculó con la ecuación 4.3 donde  $Do$  es largo de la diagonal,  $L$  corresponde al ancho de la zona estudiada,  $s1$  y  $s2$  corresponden a los registros de lvdT de las diagonales. El desplazamiento de corte entrega solo 8 mm por lo que no controla en el muro. Para el lado cordillera los resultados no son simétricos ya que el sensor de flexión del lado opuesto se desprendió del muro antes de llegar al final del ensayo. El desplazamiento total se calculo sumando el corte y flexión y es el que se observa en la figura 4.14 todos estos datos se tomaron hasta el drift 2,5% ya que se sacaron los ciclo que tenían problemas estos muestran que están bajo lo esperado para ese punto.

$$U_f = \alpha \left( \frac{V1 - V2}{l} \right) h1 \quad (4.2)$$

$$\bar{U}_s = \frac{Do}{2L} (s1 - s2) \quad (4.3)$$

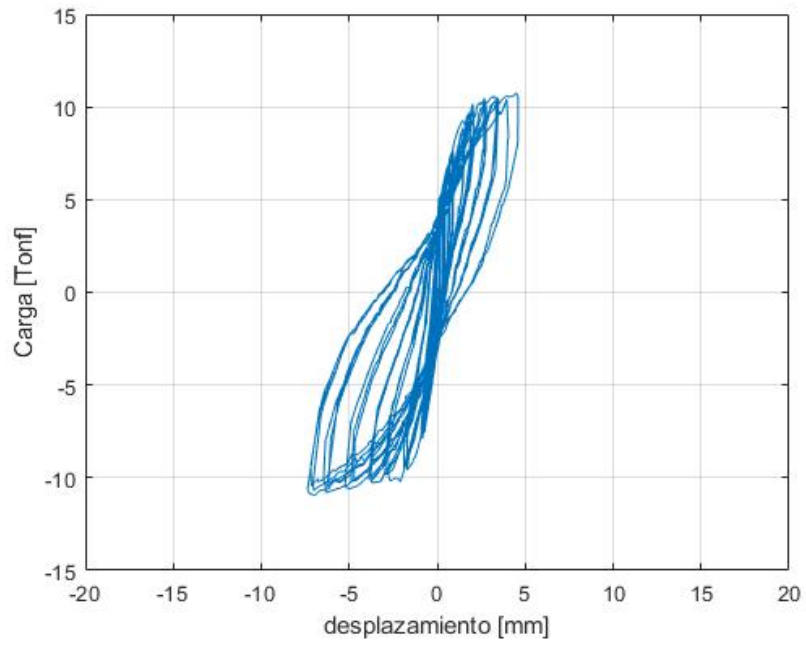


Figura 4.12: Desplazamiento corte al 2,5%

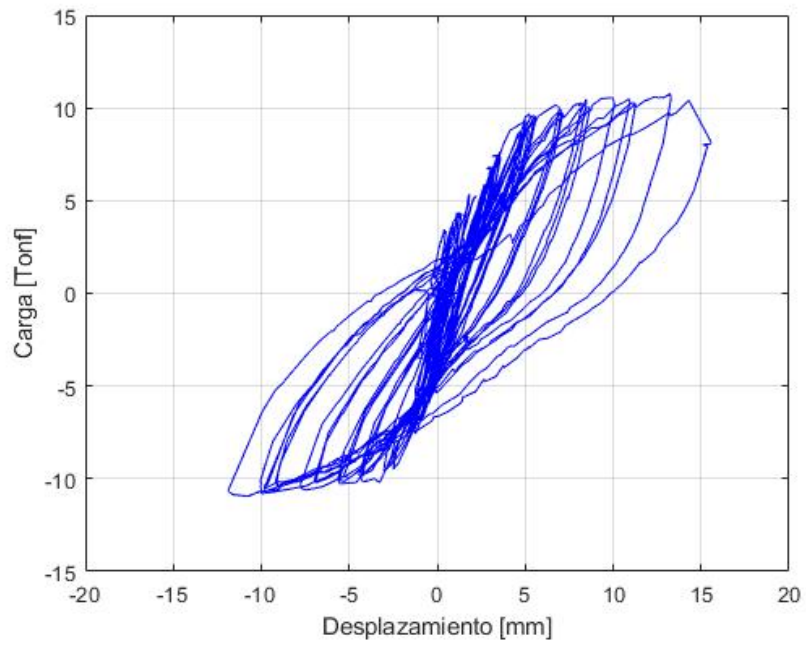


Figura 4.13: Desplazamiento de flexión al 2,5%

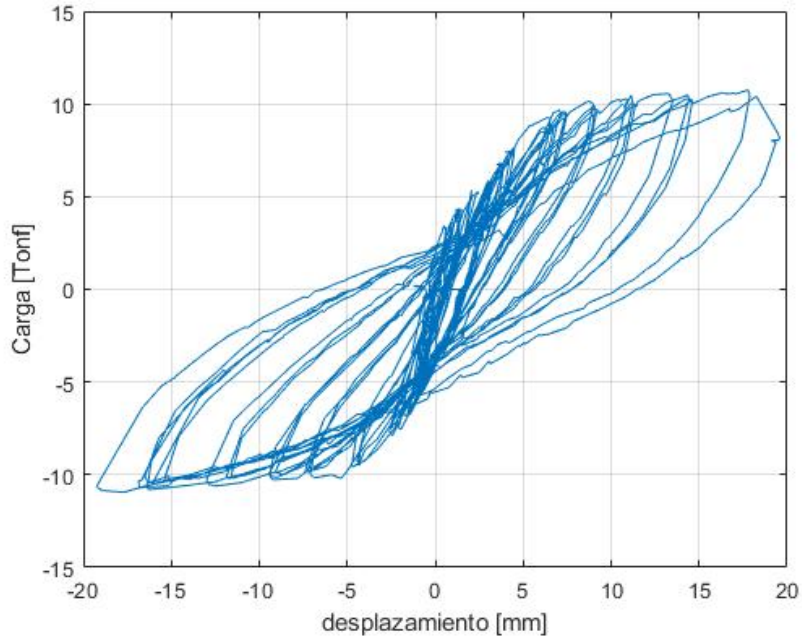


Figura 4.14: Desplazamiento total al 2,5 %

En la figura 4.15 podemos observar una comparación entre el aporte del corte la flexión la suma de ambos y es desplazamiento real corregido, en estos resultados podemos observar que el desplazamiento de la suma de corte y flexión nos da de 20 mm aproximadamente para el drift de 2,5 % y el desplazamiento corregido del muro fue de 34 mm por lo que no son comparables esto se debe a que los sensores que mas aportaban en flexión en el borde inferior de muro fueron posicionados sobre una placa a una distancia aproximadamente de 1 cm desde la fundación y en el transcurso del ensayo justo en esa zona se produjo una grieta de gran envergadura que no alcanzaba a ser medida por los sensores inferiores lo que provoco el error en la medición de flexión, los resultados del corte se encuentran en el rango esperado entre un 10 % y 20 % según los resultados presentes anteriores para muros de este tipo con el mismo modo de falla por flexo-compresión [16].



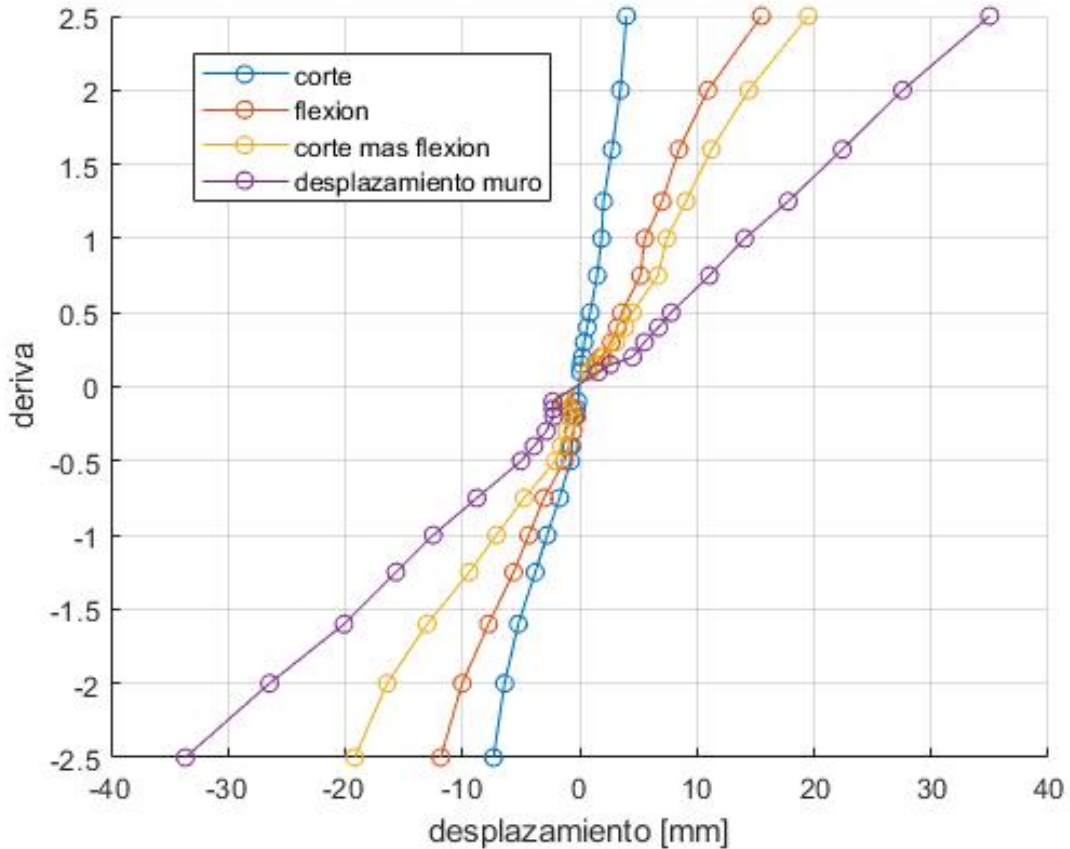


Figura 4.15: Comparación derivada 2.5 %

## 4.6. Evolución de daño muro 2

Este ensayo parte del drift del 0,1 % al igual que los anteriores, el primer drift se controla carga 3,5 tonf llegando a un desplazamiento de techo de 1,4 mm en este drift para todos los ciclos no se perciben grietas. En el segundo drift de 0,15 % se controla por carga de 4,5 tonf llegando hasta 2,2 mm de desplazamiento, en este punto podemos ver aparecer la primera grieta del ensayo esta es una pequeña fisura horizontal a la mitad del muro.

Ya en el 3° drift de 0,2 % que se controla por carga de 5,5 tonf llegando hasta un desplazamiento de techo de 2,72 mm en ese momento la fisura que se menciona en el segundo drift ya corta el muro por un solo lado. Las fisuras siguen creciendo en cada drift pero son pequeñas y se ven muy poco en las fotos.

En el 7° drift para 0,75 % para un desplazamiento de techo 10,2 mm llegando a una carga de 9,7 tonf, Aparecen las primeras grietas visibles a simple vista de la cara norte lado costa en el peak en cordillera estas se pueden observar en la figura en color azul.

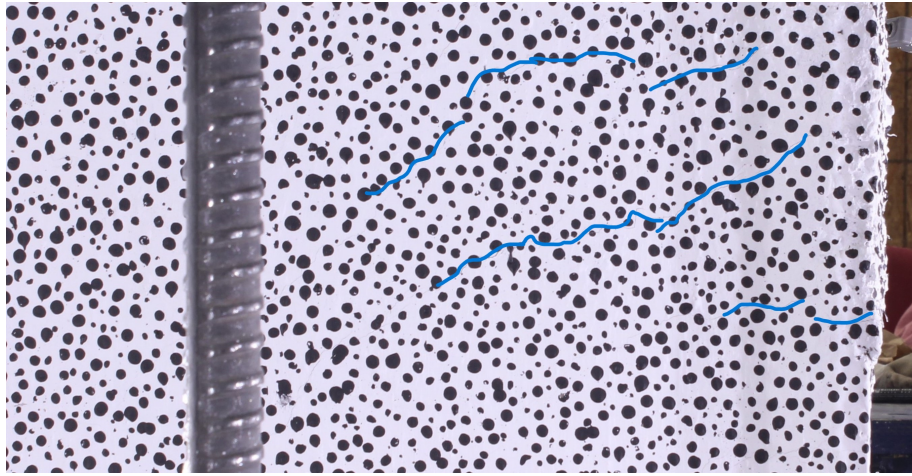


Figura 4.16: Muro drift 0,75 %

En el octavo drift para 1 % controlado por desplazamiento de 13,6 mm llegando a una carga 10,2 tonf en el primer ciclo nace una grieta grande y visible en la base del muro para el lado costa en el peak en lado cordillera esta mismo sucede en el lado cordillera pero la grieta es un poco mas pequeña esto se observa en la figura 4.17 corresponde al lado cordillera y la figura 4.18 al lado costa.

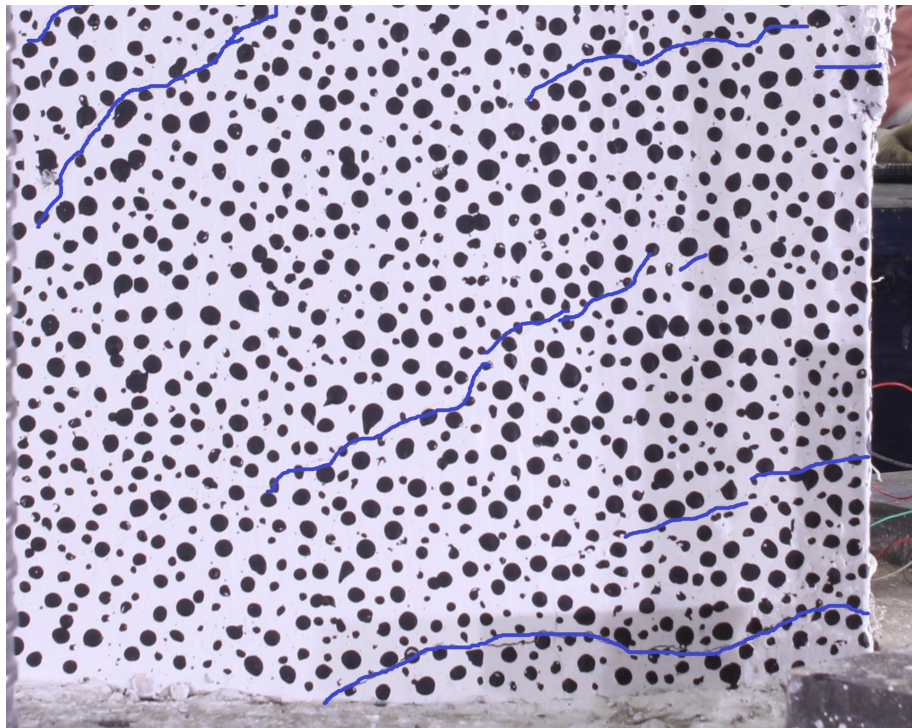


Figura 4.17: Muro drift 1 % lado cordillera

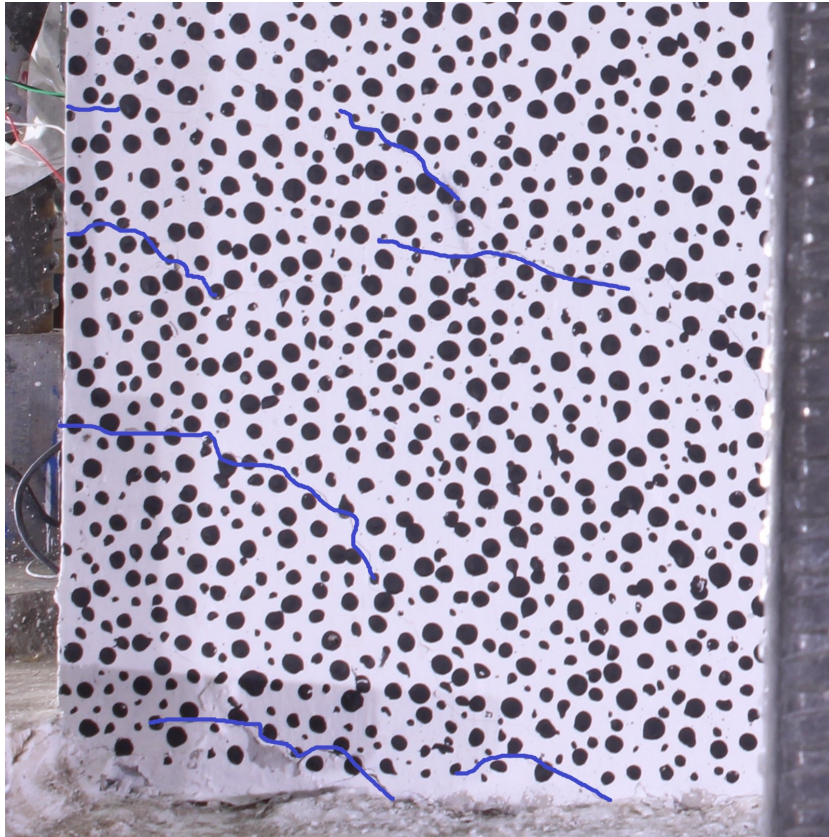


Figura 4.18: Muro drift 1 % lado costa

En el drift 9 de 1,25 % y 10 de 1,6 % vemos como las grietas inferior del muro en el lado cordillera empieza a crecer y vemos un pequeño desprendimiento de hormigón en la esquina del borde del muro como se observa en la figura 4.19 para el drift 1,25 % y en la figura 4.20 para el drift 1,6 %.



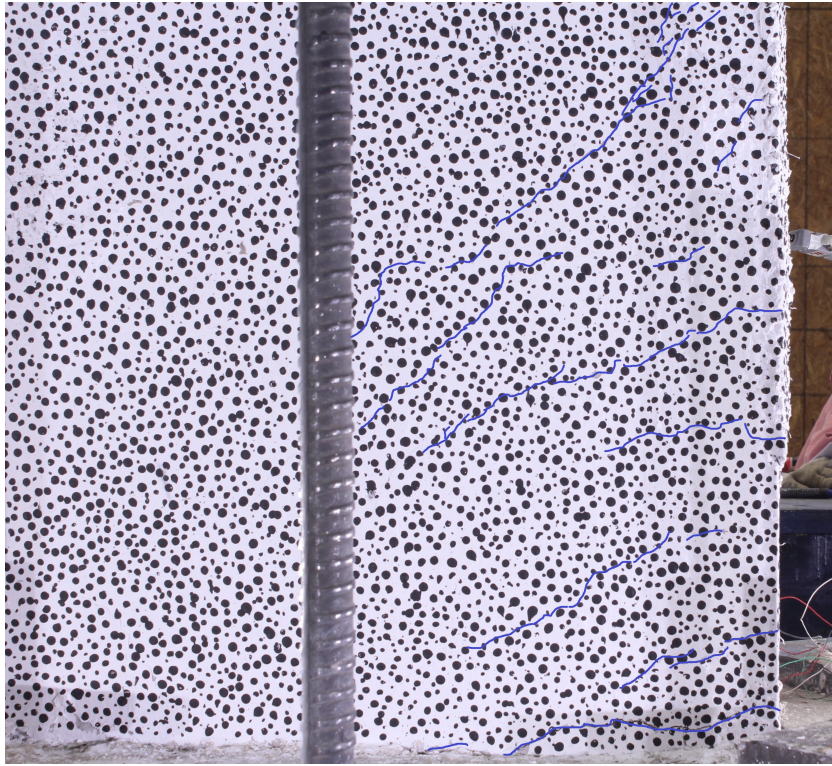


Figura 4.19: Muro drift 1,25 %

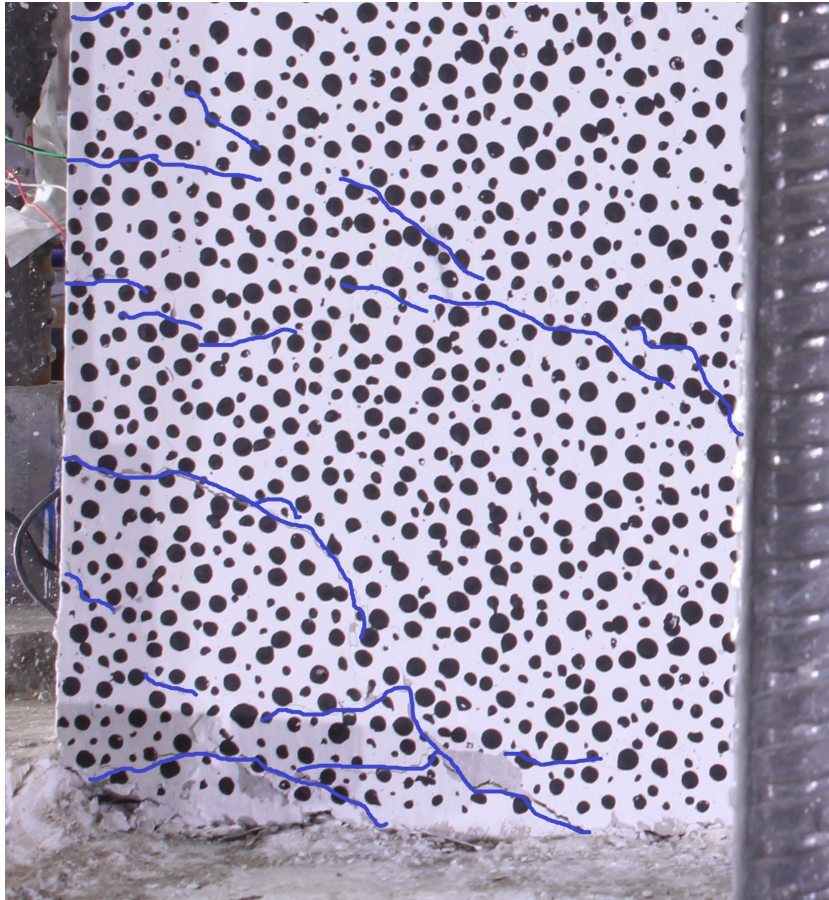


Figura 4.20: Muro drift 1,6%

Para 11° drift de 2% se presenta descascara miento del borde cordillera y la grieta del borde del muro es mucho más pronunciada que en los drift anteriores como se observa en la figura 4.21. En el drift 12 para un desplazamiento de techo de 2,5% en el segundo ciclo, cargando a costa, cae la carga a de 10 a 8 tonf y suena el corte de barra, aun no se aprecia visualmente pero se observa el mayor deterioro de esa zona, en la siguiente figura 4.22 se ve una foto del momento del corte de la barra donde el círculo rojo muestra la zona del corte, se produce una forma asimétrica de la carga ya que el lado costa sigue llegando hasta una carga de 10 tonf y el lado cordillera solo llega hasta 8 tonf.



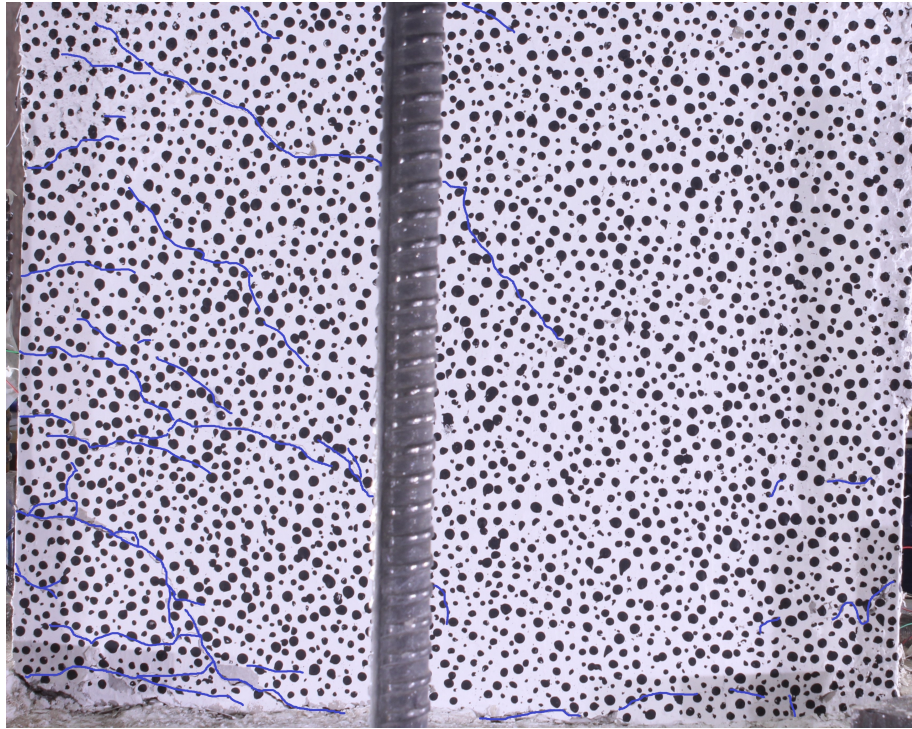


Figura 4.21: Muro drift 2 %

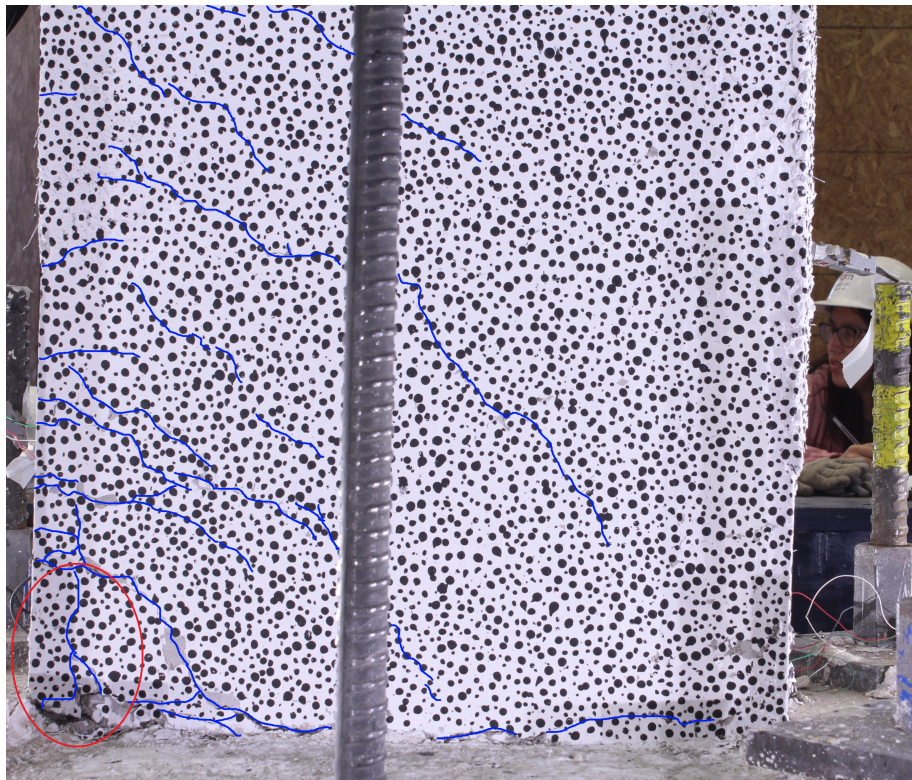


Figura 4.22: Muro drift 2,5 %

Para el 13° drift de 3.2 % en el segundo ciclo se produce un descascaramiento de la zona



cordillera, el pandeo de la barra longitudinal en el tercer ciclo hace que se corte la barra longitudinal de la zona sur-cordillera esta barra tiene un diámetro de 12 mm esto hace que la carga caiga de 8 tonf a 5,7 tonf para el lado cordillera haciendo la asimetría mas grande llegando a 9 tonf en el lado costa, también se desprende un trozo de hormigón del borde cordillera mostrando la falla en compresión en esa zona, lo que deja ver los cortes de barra producidos y el pandeo de estas, esto se observa en la figura 4.23.

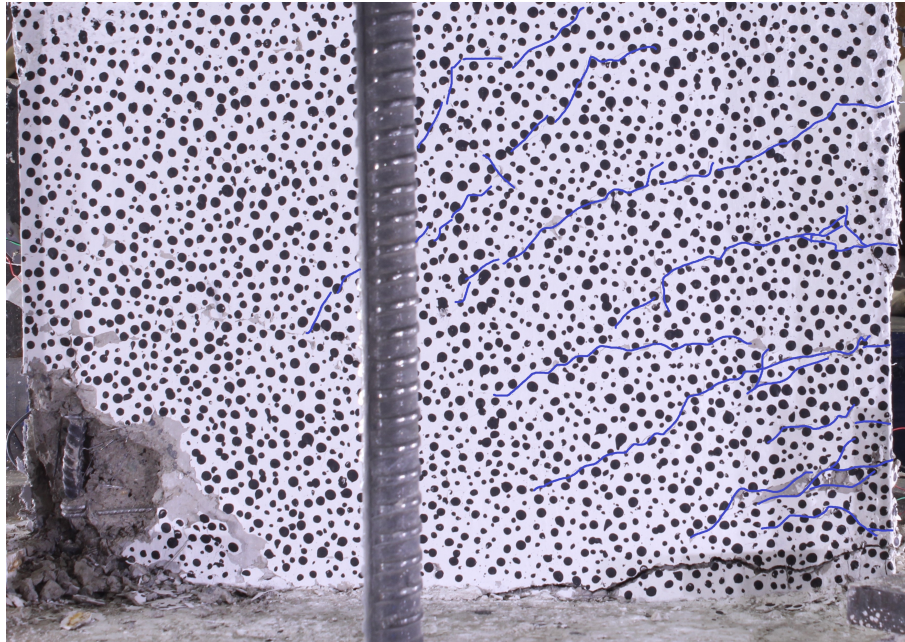


Figura 4.23: Muro drift 3,2%

En el 14° drift correspondiente al desplazamiento de techo del 4% llegando en el primer ciclo a 8,7 tonf Se corta la barra de diámetro 6 mm longitudinal norte-cordillera y cae la carga a 4,8 tonf, es recién en el Segundo ciclo del drift 14 donde se presenta descascaramiento en la zona de la costa como se observa en la figura 4.24 . El ensayo se desarrolló hasta el drift 4% donde este perdió carga en el segundo ciclo en la inclinación hacia el lado costa llegando hasta un desplazamiento de 56.7 mm en este punto presentaba una carga 4,7 tonf para el peak lado costa, esto debido a las 3 barras que se cortaron en el lado cordillera. El muro al terminar el ensayo presento diversas grietas visibles que son las que se observan en la figura 4.25, también en las fotos de las laterales podemos observar el corte de las barras del 12 que se encontraban en los bordes del muro y como se cortaron además los estribos de esa sección como se observa en la figura 4.26. A pesar de los cortes de barra anticipado que hicieron que fluyeran las barras del lado cordillera llegando a la capacidad de estas del lado cordillera pero no del lado costa, el modo de falla del muro fue dúctil ya que la carga fue decayendo en cada ciclo desde su máximo en cantidades pequeñas para el lado peak cordillera que no fue afectado por los cortes de barra, y fallo por flexo-compresión.

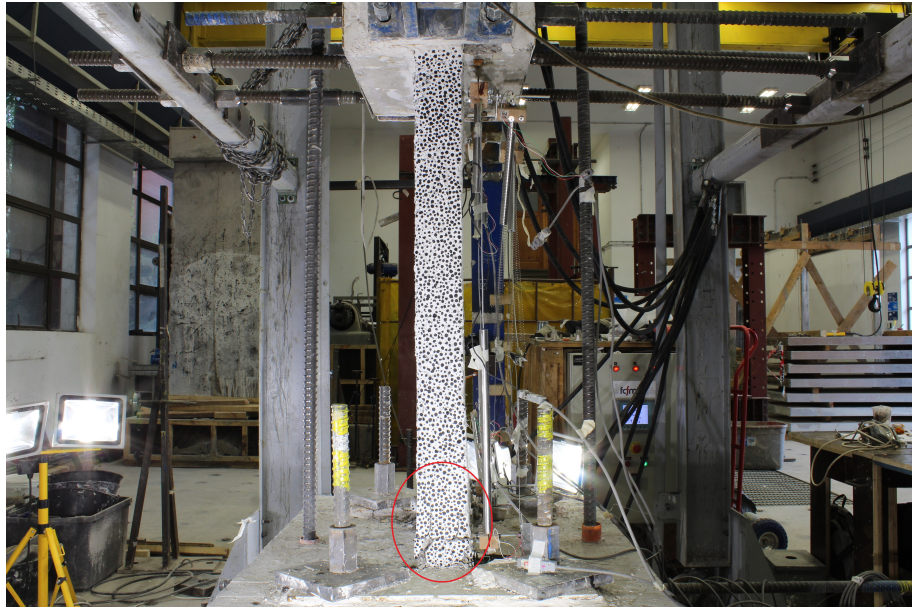


Figura 4.24: Descascaramiento de lado costa en el ciclo 2

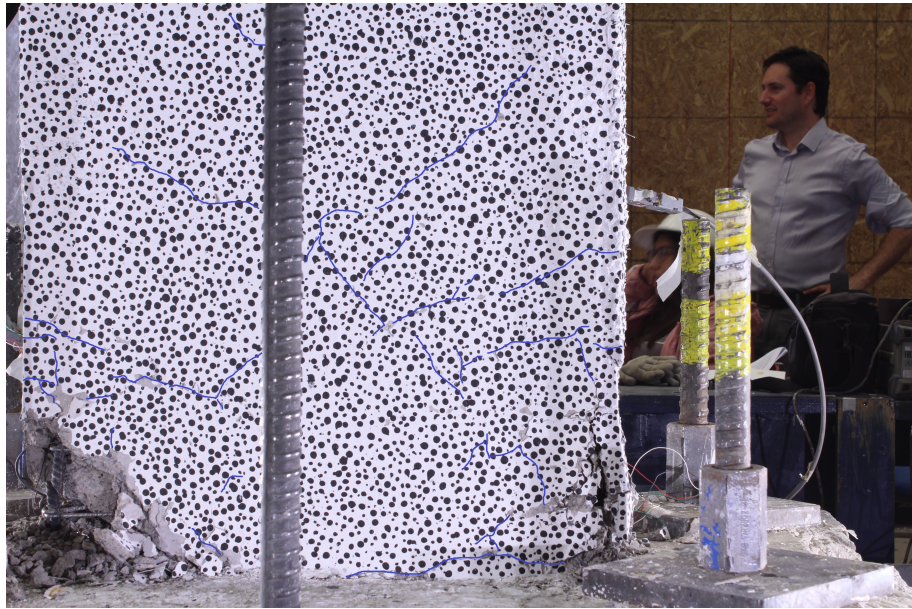


Figura 4.25: Muro 2 al finalizar el ensayo





Figura 4.26: Lado cordillera al finalizar

En la figura 4.27 podemos ver mejor el corte de las barras después de retirar el hormigón de esa zona posterior a eso se cortaron las barras para analizar que provoco el corte anticipado y se observa que el corte de barra es debido a que al colocar los hilos sin fin en el hormigón endurecido del muro el taladro que se utilizo para hacer el orificio en el que se introdujo este hilo, paso a llevar la barra longitudinal de diámetro 12 mm del borde cordillera sur del muro lo que hizo que esta barra se debilitara en esa zona y se cortara con anticipación en el drift de 2,5%, esto se observa en la figura 4.28 donde se aprecia el desgaste producido por el taladro en la barra justo en la zona de corte.



Figura 4.27: Cortes de barra después de retirar hormigón



Figura 4.28: Daño por taladro en barra de 12 mm de lado sur

## 4.7. Respuesta global muro 3

En la figura 4.29 podemos ver el resultado de la histéresis del muro 3 que corresponde al de reemplazo de acero por fibra, después de corregir los datos por desplazamiento y giro con la ecuación 4.1 antes presentada, este gráfico muestra el desplazamiento de techo según la carga aplicada, podemos observar que esta tiene una forma simétrica para ambos lados siendo el lado negativo cuando se inclinaba hacia la cordillera y el positivo peak hacia la costa, por lo que podemos ver que el ensayo termina en el primer ciclo para inclinación lado costa, este ensayo se llevo a cabo hasta el drift 2,5% sin completar el primer ciclo llegando solo al peak del lado cordillera llegando hasta un desplazamiento máximo de 34 mm y terminando el ensayo en la inclinación lado costa al llegar hasta 32,6 mm cuando hubo una caída drástica de la carga. La carga máxima la encontramos en el drift del 1,6% en el primer ciclo en el peak lado cordillera con un desplazamiento de techo del 21,58 mm, después de este peak la carga vario levemente empezando la degradación de la carga en el drift del 2% en el segundo ciclo, siendo esta degradación de la resistencia no mayor al 15% antes de terminar el ensayo al caer totalmente la carga al fallar por corte, teniendo una falla del tipo frágil.



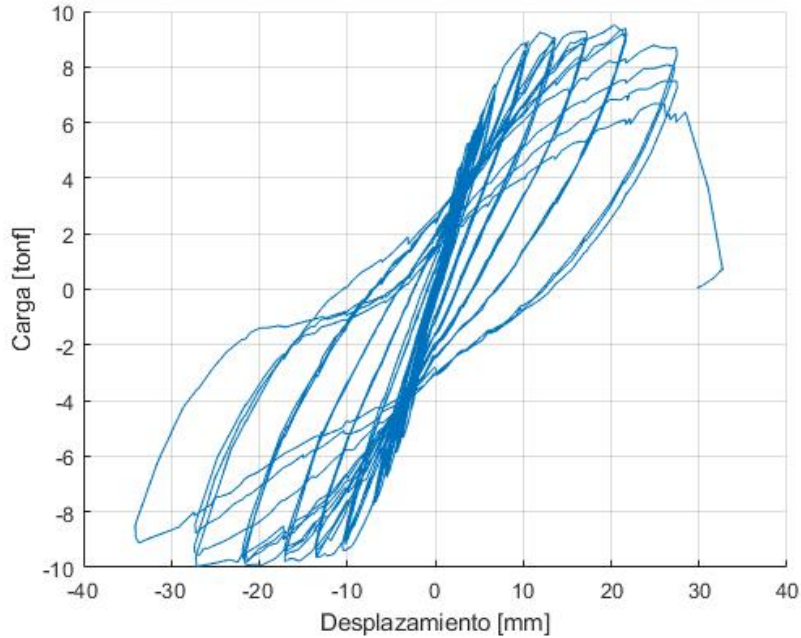


Figura 4.29: Histéresis muro 3

## 4.8. Evolución de daño muro 3

El ensayo parte en el drift 0.1 % este se controla por carga hasta llegar a las 5 tonf, de ahí hacia adelante se empieza a controlar por desplazamiento, este muro al igual que los otros se inicia con una carga axial de 16 tonf real. En el primer drift, controlado por una carga de 3.5 tonf, llegando a un desplazamiento de techo de 2 mm, no se observan grietas ni fisuras visibles a la vista ni en las fotos tomadas. El segundo drift de 0.15 % se controla por carga una de 4.5 tonf, llegando a un desplazamiento de techo de 3.1 mm, no se observan grietas ni fisuras visibles. Es ya en el tercer drift de 0.2 %, donde se estaba controlando por una carga de 5.4 tonf, llegando a un desplazamiento de techo de 4.2 mm, donde se observa la primera grieta al lado costa del muro en el centro de este cuando se encuentra con peak en el lado cordillera, esta grieta es pequeña y difícil de percibir a simple vista y se observa en la figura 4.30.

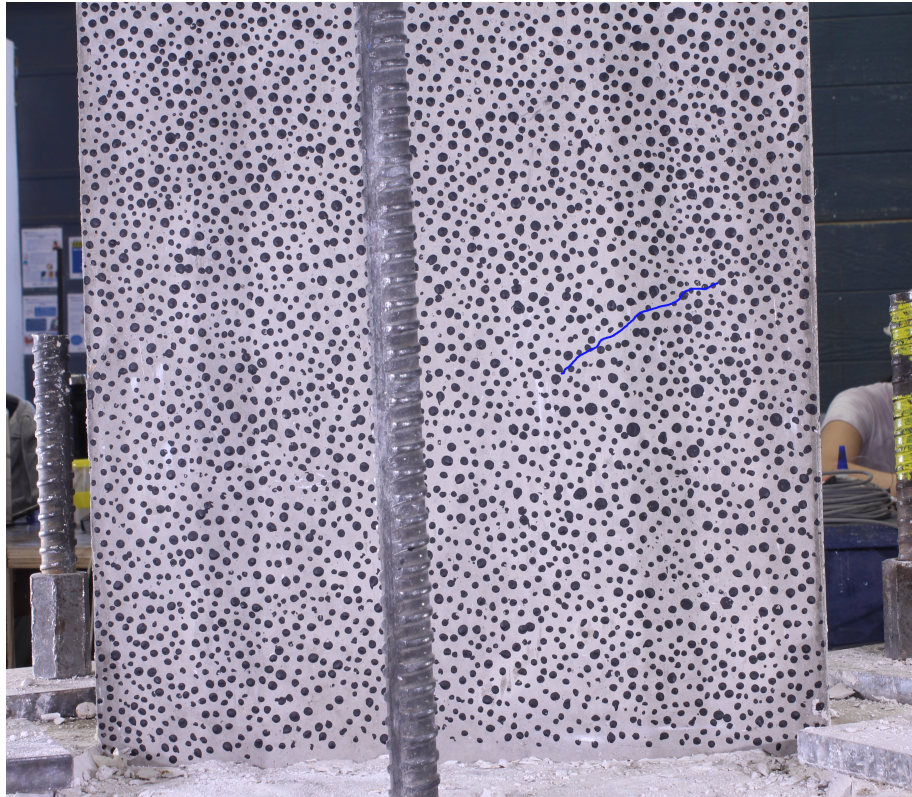


Figura 4.30: Primera fisura muro 3

En el 4° drift de 0,4% de desplazamiento de deriva de techo se controla por desplazamiento, aquí comienzan aparecer las primeras fisuras considerables a ambos lados del muro aparecen en el lado costa, una gran fisura horizontal en la base del muro, además aparecen otras grietas una de ellas la que está en rojo en diagonal en el centro del muro como se observa en la figura 4.32, para el lado cordillera aparecen solo grietas diagonales en la base del muro como se observa en la imagen de la figura 4.31.

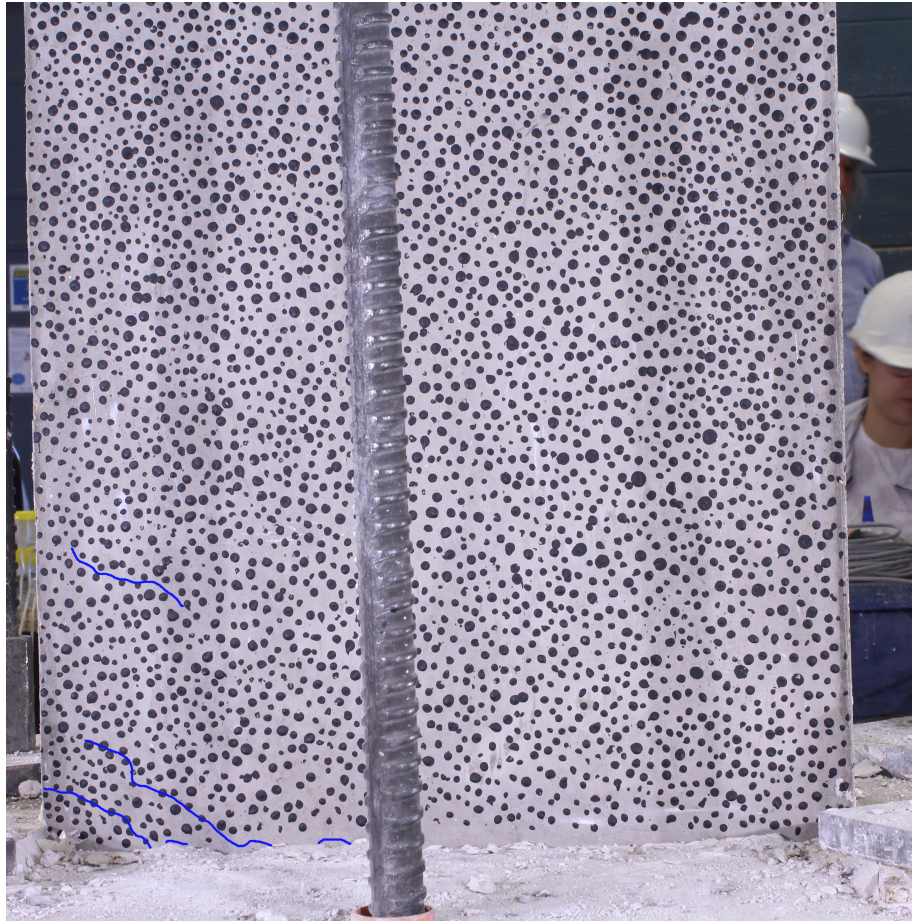


Figura 4.31: Muro drift 0,4% lado cordillera



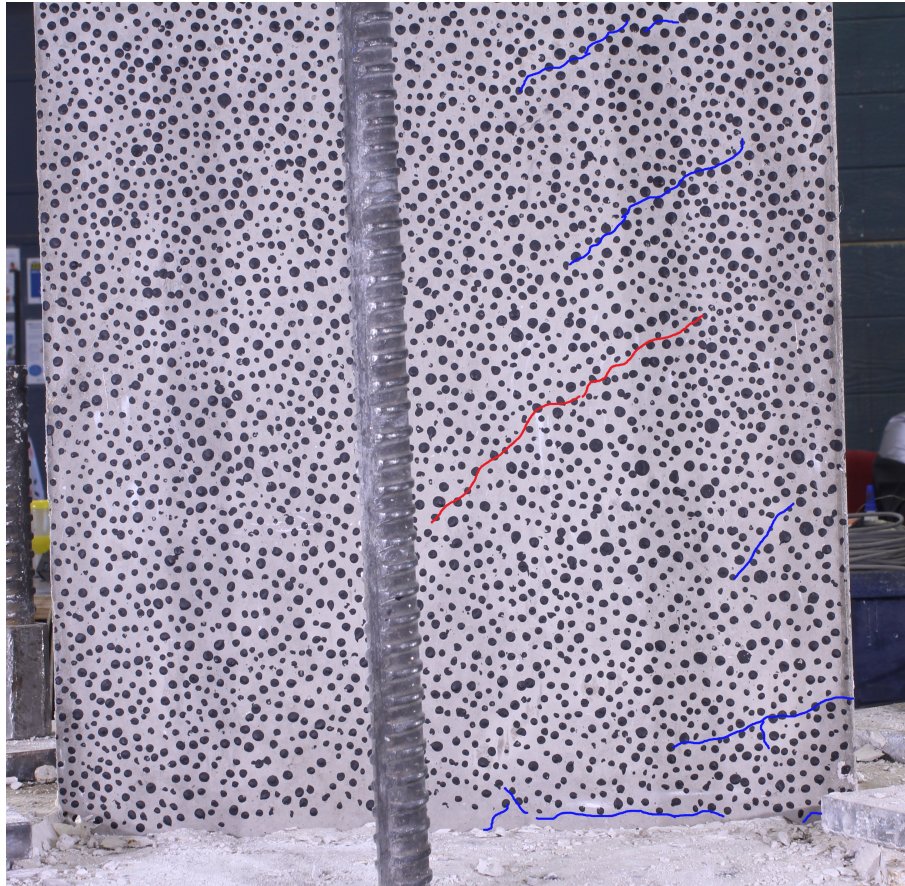


Figura 4.32: Muro drift 0,4% lado costa

Para el drift 6 y 7 de 0,5% y 0,75% podemos ver como las grietas en la base del muro crecen y aparecen nuevas grietas diagonales que atraviesan el muro desde el lado cordillera al costa cuando el peak está en el lado costa como se observa en la figura 4.33 donde en rojo podemos ver las nuevas grietas que se formaron y en azul las grietas anteriores que crecieron su tamaño tanto en extensión como en espesor.

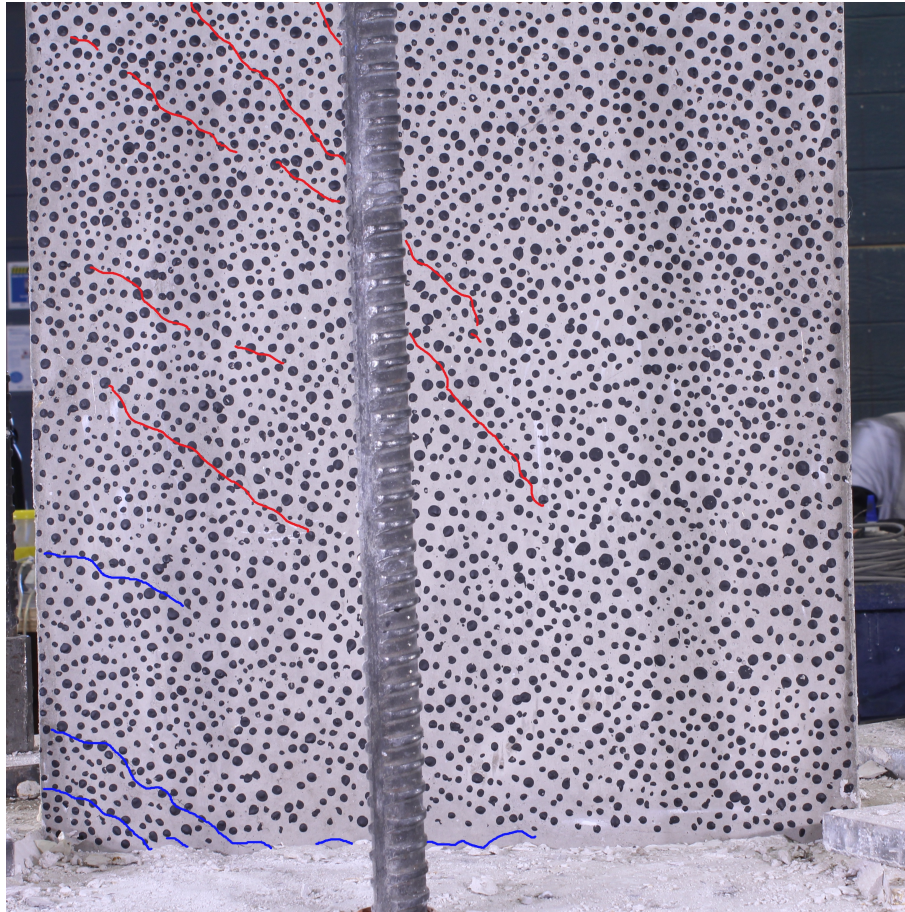


Figura 4.33: Muro drift 0,75 %

En el drift 10 de 1,6% de desplazamiento de techo en el primer ciclo se produce la máxima carga de 10 tonf en el primer ciclo inclinación lado cordillera esta se mantiene en rangos similares para este lado ya que el lado peak costa el máximo llega a 9,5 tonf y se mantiene en rangos similares en todo el drift 1,6%. En el drift 11 de 2% de desplazamiento de techo controlando por un desplazamiento de 27,2 mm llegando a una carga de 10 tonf en el segundo ciclo, ocurre la primera falla por compresión en el borde inferior costa del muro, como se observa en la figura 4.34, que además del pandeo de las barras del 12 podemos ver que en este punto el daño se centra en la base del muro en los primeros 30 cm en los bordes, además de las grietas en el centro del muro que ya al pasar este punto han crecido en espesor, la grieta horizontal ya atraviesa el muro de lado a lado. Para el lado costa podemos ver que aún no hay daño por compresión considerable en el borde inferior del muro pero podemos observar en las figuras que las grietas son simétricas para cada lado. Para ese mismo drift en el tercer ciclo en el peak lado cordillera podemos ver como falla el borde inferior del muro del lado cordillera por compresión como se observa en la figura 4.35.



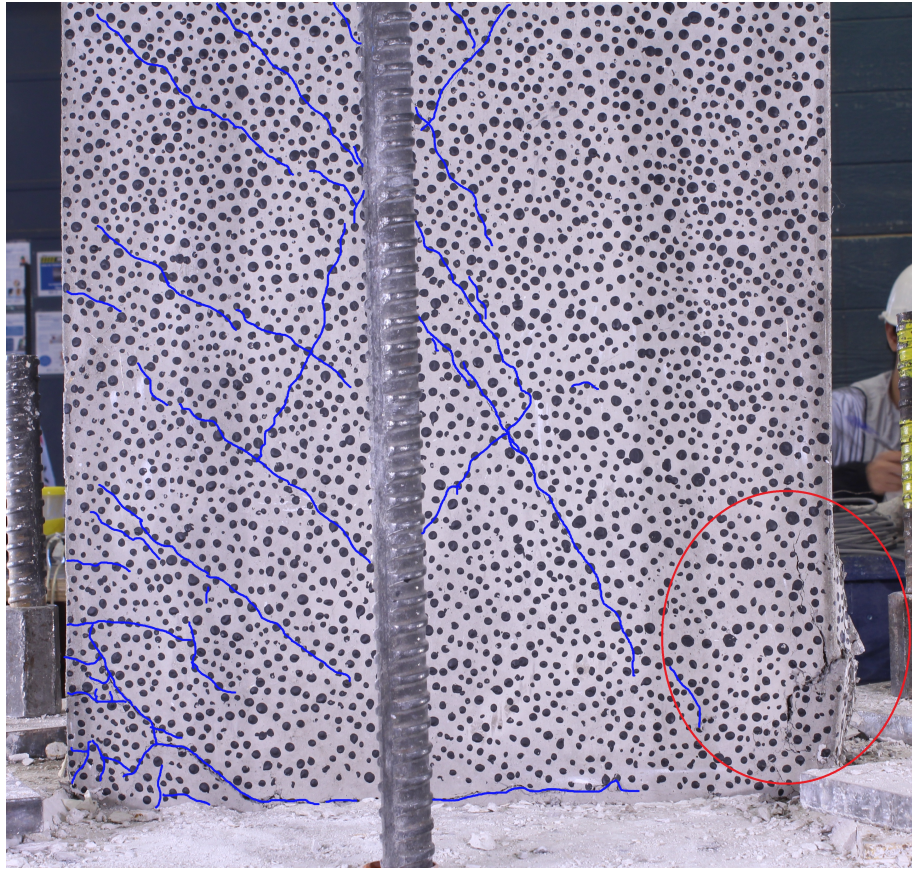


Figura 4.34: Muro drift 2%lado costa

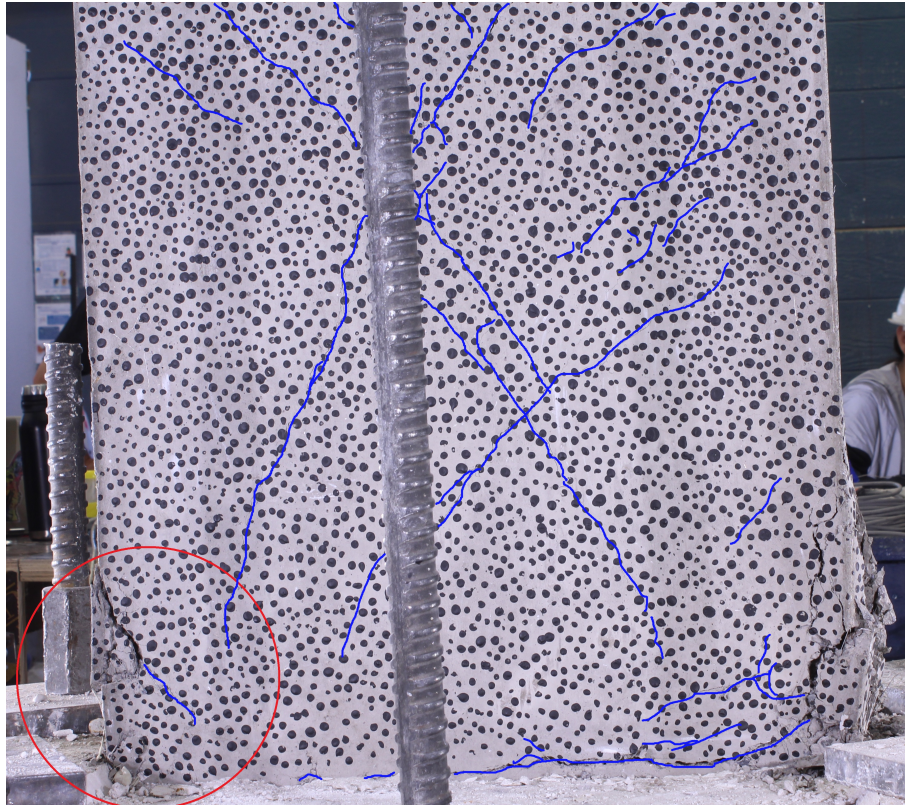


Figura 4.35: Muro drift 2%lado cordillera

El ensayo se desarrolla hasta el drift 2,5% donde en este punto se pierde la carga en el segundo ciclo, en la inclinación hacia el lado costa, llegando hasta un desplazamiento de 32.66 mm, cuando en el mismo ciclo para este drift en el lado cordillera se llego hasta 34 mm; el muro presento diversas grietas que son las que se observa en la figura 4.36 , estas están a lo largo de todo el muro pero se concentran en la base del muro y en su centro desde los bordes, también en las laterales podemos observar el pandeo de las barras del 12 que se encontraban en los bordes del muro. En la figura 4.37 se puede apreciar como quedo el muro después de terminar el ensayo donde se ve en color negro una gran grieta de corte que atraviesa de forma diagonal el muro desde el lado cordillera al lado costa, esta grieta estuvo presente desde los primeros ciclos del ensayo y creció en cada ciclo y drift esta era también apreciable en el lado sur del muro.



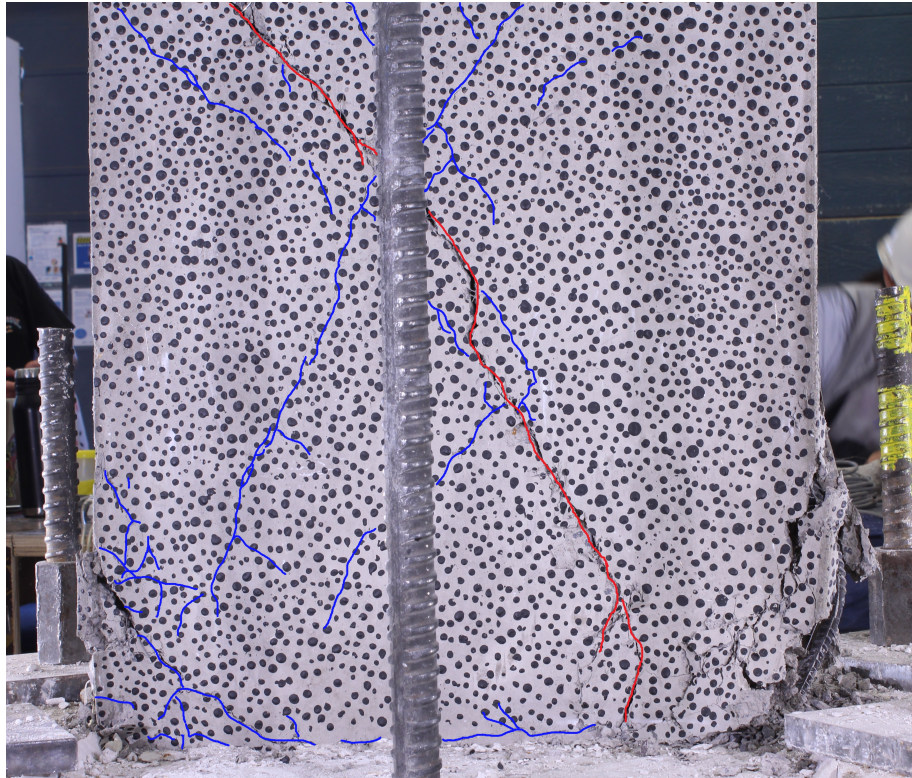


Figura 4.36: Muro drift 2,5%lado costa

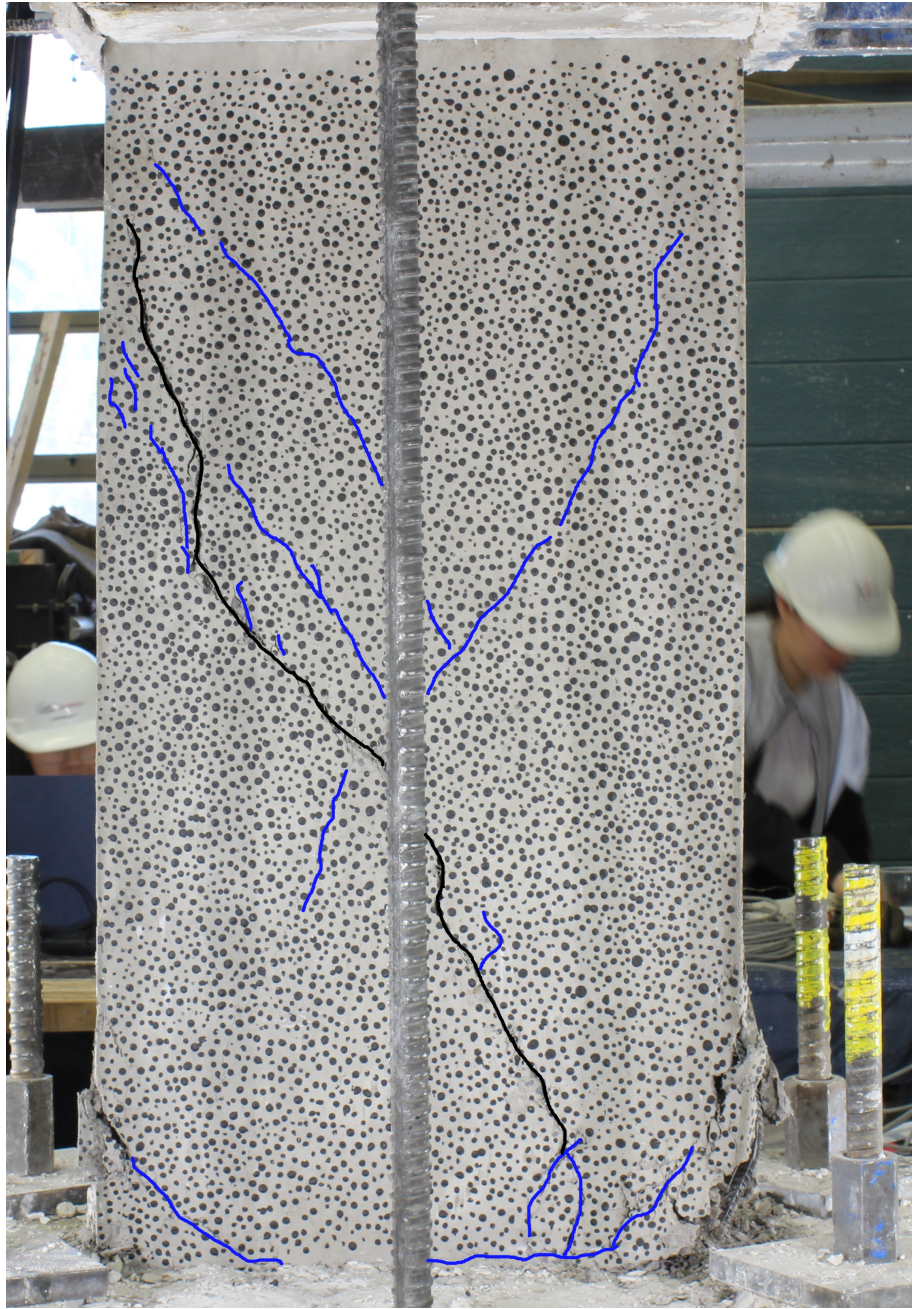


Figura 4.37: Muro 3 al terminar el ensayo

## 4.9. Analisis Comparativo

### 4.9.1. Resistencia

Haciendo una comparación entre los 3 muros en cuanto a la carga para su resistencia máxima podemos ver en la tabla 4.2 que el muro que entrego una mayor resistencia es el muro 2 con fibra y confinamiento dándose esta carga para ambos peaks para el drift 2,5 % entregando una resistencia un 3,5 % mayor que el muro 1 y 10 % mayor que el muro 3, para el muro 1 que es el que tiene confinamiento y hormigón tradicional la carga máxima se produce en el peak lado costa para el drift 3,2% y para el muro 3 la resistencia máxima se produce mucho antes en el drift 1,6%. La degradación de la carga en cada uno es de manera distinta en el muro 1 empieza a degradarse la carga en el ciclo de 4 % cayendo a 9,5 tonf en el primer ciclo y después a 7,5 tonf cayendo un 32% la carga en el segundo ciclo peak lado cordillera para fallar en el peak lado costa cuando termino el ensayo. En el muro 2 la degradación de la carga para el lado que no hubieron fallas por los cortes de barras es notoria recién en el drift 3,2% cuando la carga cayo a 9,7 ton en el segundo ciclo y a 9,1 ton el tercer ciclo es ya para el drif del 4 % que la carga cae a 8 tonf en el primer ciclo y a 7,7 tonf el segundo ciclo lo que hace que tenga una degradación de la carga de cerca del 30%. El muro 3 comienza a notar la degradación de la carga en el drift de 2 % donde la carga cae a 8,9 tonf en el tercer ciclo teniendo una degradación de 11 % antes de que este falle en el primer ciclo del drift 2,5 % la cual ocurre mas rápido al terminar el ensayo.

Tabla 4.2: Resistencia máxima muros

muro	carga máxima [tonf]
1	10,62
2	11
3	10

### 4.9.2. Rigidez

Las rigidez de los muros fueron calculados como la secante de la curva carga-desplazamiento de los muros para el lado positivo ( peak lado costa) excepto para el muro 2 que muestra los peaks lado negativo, esto ya que el lado positivo al tener las caídas de carga por los cortes de barra mostraba una curva de rigidez mucho menor que la real. En la figura 4.38 podemos ver como los muros 1 y 2 presentan una curva de rigidez muy similar y en los mismos rango de valor comparados con el del muro 3 que es mucho menor esto debido a que el muro 1 y 2 presentaban confinamiento en los bordes lo que hizo que la curva fuera mucho mayor para ambos al contrario del muro 3 que no posee confinamiento de borde ni armadura horizontal ni vertical, lo que hizo que tuviera un cambio en la secante mucho menor.



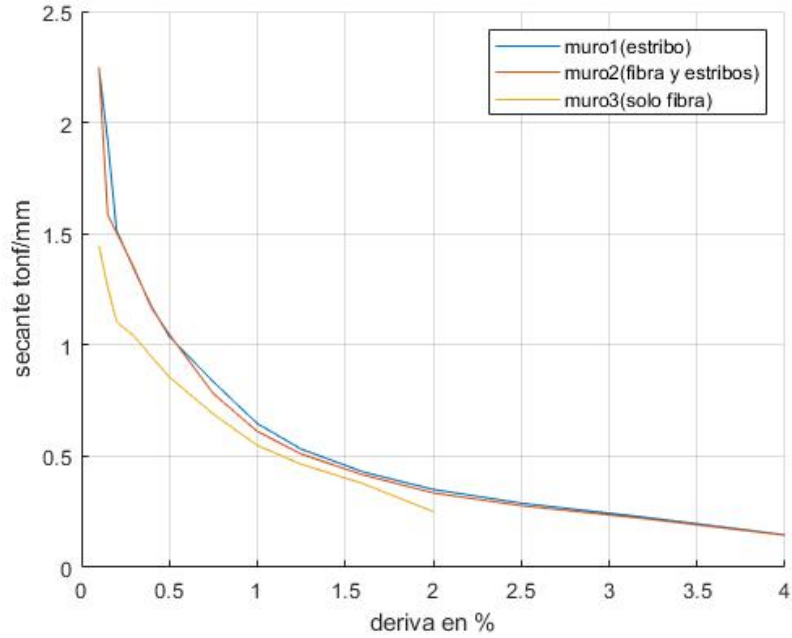


Figura 4.38: Secante de los muros 1, 2 y3

Como el muro 2 tuvo una falla en las barras de borde ubicadas en el lado cordillera hizo que los peaks de la inclinación hacia el lado costa (lado positivo) se vieran afectado esta por la caída de la carga que cada corte barra produjo lo que afecto en la rigidez de cada lado por lo cual se puede ver en la figura 4.39 que el lado negativo corresponde al peak lado cordillera mostró una curva de rigidez mucho mayor que el lado negativo.

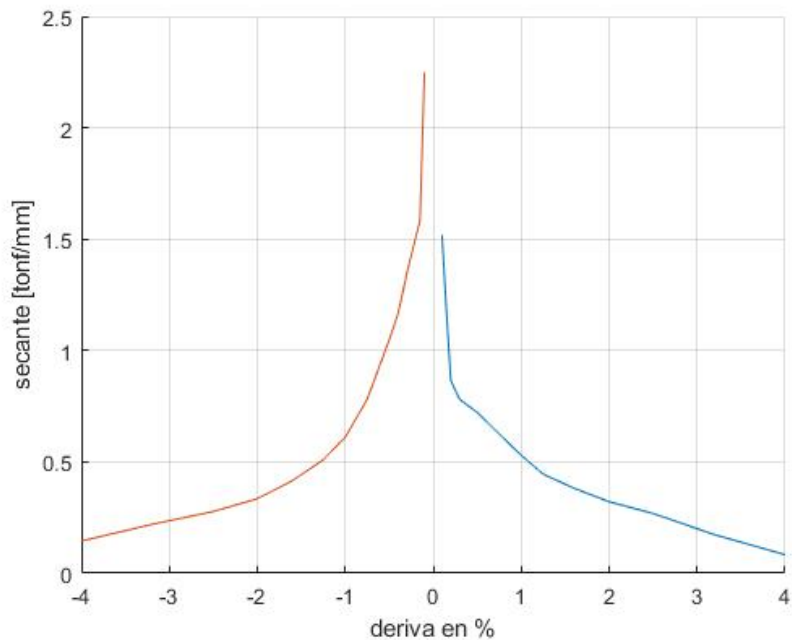


Figura 4.39: Secante muro 2 ambos lados

### 4.9.3. Deriva de techo y Energía

En relación con la energía disipada por los muros, la Figura 5.22 ilustra el progreso de la disipación de energía. Las líneas punteadas representan la cantidad de energía disipada en cada nivel de deriva, mientras que la línea continua registra la energía disipada acumulada durante el ensayo. El criterio empleado para calcular la energía corresponde al área bajo la curva de carga versus desplazamiento. Se observa que la energía disipada hasta una deriva del 2,5% que es justo el punto donde se corta la primera barra se mantiene en rangos similares debido a la semejanza en las rigideces de ambos muros tanto para el muro 1 y muro 2, no así el muro 3 que tiene una menor disipación de energía este se debe a que contaba con una menor cantidad de armadura y no tenía confinamiento de borde.

En la curva de energía-desplazamiento podemos ver como el muro que mayor energía disipa es el muro 1 con confinamiento en los bordes pero sin fibra siendo ligeramente superior el comportamiento del Muro 2 con fibra y confinamiento a diferencia del muro 3 que su comportamiento fue menor y no alcanzo a completar un ciclo del drift 2,5%.

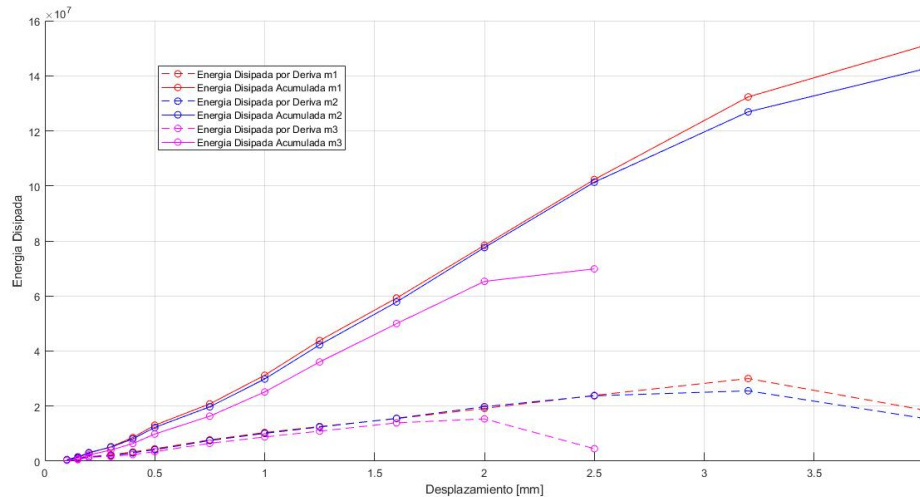


Figura 4.40: Energía disipada de cara muro

#### 4.9.4. Desplazamiento de techo y carga

Se puede observar en la figura 4.41 la comparación de la curva de envolvente para el desplazamiento de techo en mm y la carga de cada uno de los muros, en este gráfico podemos observar que los muros se comportan de manera simétrica siendo el muro con confinamiento y fibra el que llega a un mayor desplazamiento de techo a pesar del corte de barra anticipado y el muro sin confinamiento y acero el que resistió una mayor carga, pero todos llegan a una resistencia máxima similar aproximadamente de 11 tonf siendo el muro con fibra el que llega a un desplazamiento de techo mayor y tienen una degradación de la carga para el drift del 4% a diferencia del muro 3 que al no tener armadura horizontal ni vertical su desplazamiento es menor no así su carga máxima que es de 10 tonf.

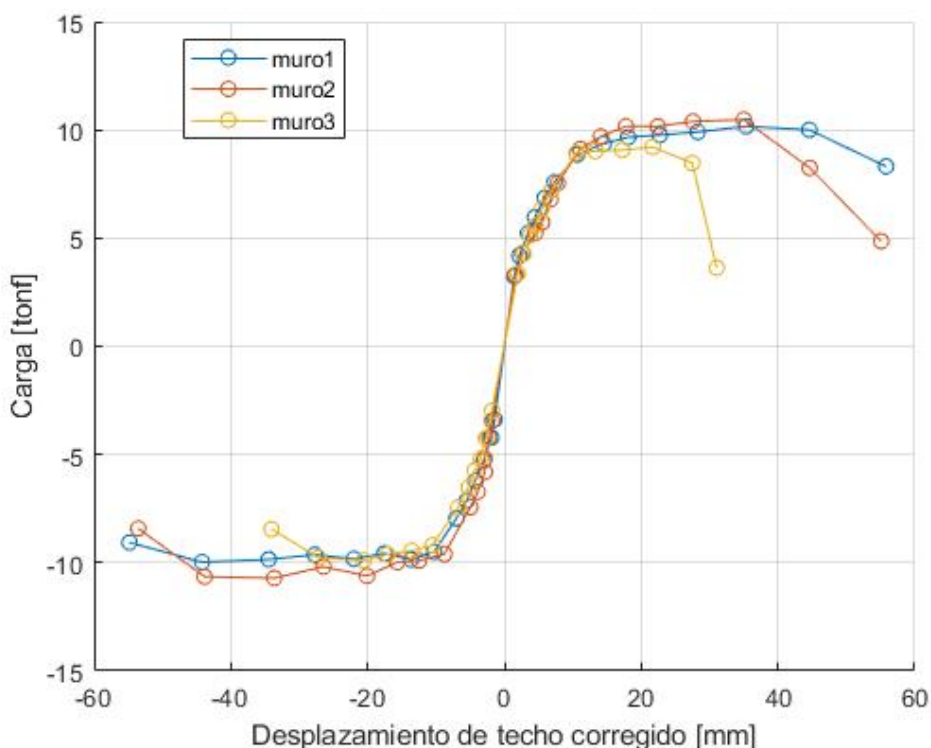


Figura 4.41: Envolvente muro 1 2 y 3

Para comparar de mejor manera los muros estos se fueron comparando uno a uno juntos además de los muros estudiados por Rodo F. y Cifuentes B. 2023, que son los muros sin confinamiento con fibra y sin fibra. En la figura 4.42 podemos observar la comparación entre el muro 1 y 2 donde vemos que ambos llegan a capacidades muy similares para el lado negativo inclinación lado cordillera a diferencia del lado positivo que al presentar los cortes de barra la carga va disminuyendo, en cuanto a el desplazamiento en ambos sentidos se presentan los mismos niveles de deriva de techo llegando hasta el drift de 4% y un desplazamiento corregido de 58 mm aproximadamente en el peak de inclinación de lado costa y cordillera. Cabe destacar que ambos muros tuvieron el mismo modo de falla por flexo-compresión y sus barras llegaron a la capacidad máxima y fluyeron.



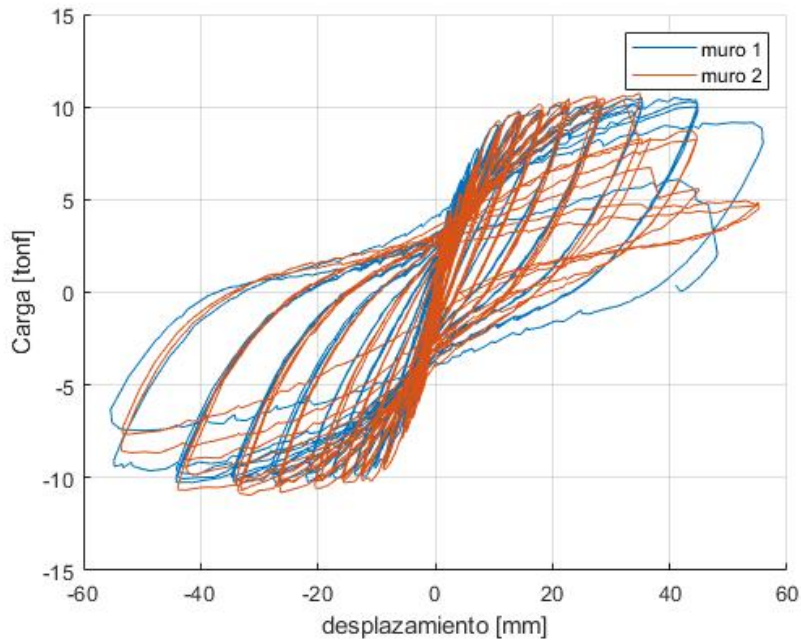


Figura 4.42: Comparación muro 1 y 2

En la figura 4.43 podemos ver la comparación del muro 1 y 3 donde el muro 1 tenía confinamiento y hormigón tradicional y el muro 3 se hizo un reemplazo volumétrico de la cantidad de barras que se sacó por fibra entregando un 0,79 % de fibra y sacando en confinamiento de borde la armadura vertical y horizontal. Esto entrego que el muro 1 fallo por flexo compresión y el muro 3 por corte haciendo que el muro 1 llegara a niveles de deriva mucho mayores que el muro 3 llegando a el 4 % y el muro 3 al 2,5 % por lo que vemos que la cantidad de fibra agregada no es suficiente para reemplazar las barras de la armadura original del muro 1 por lo que se necesita una cantidad de volumen mayor, esto debido a que las fibras son acero de pero calidad que las barra, con respecto a la carga máxima ambos llegan a capacidades similares el muro 1 llega a 10,6 y el muro 3 a 10 por lo cual la resistencia no cambia al hacer el cambio de la armadura por fibra pero si la ductilidad de este.

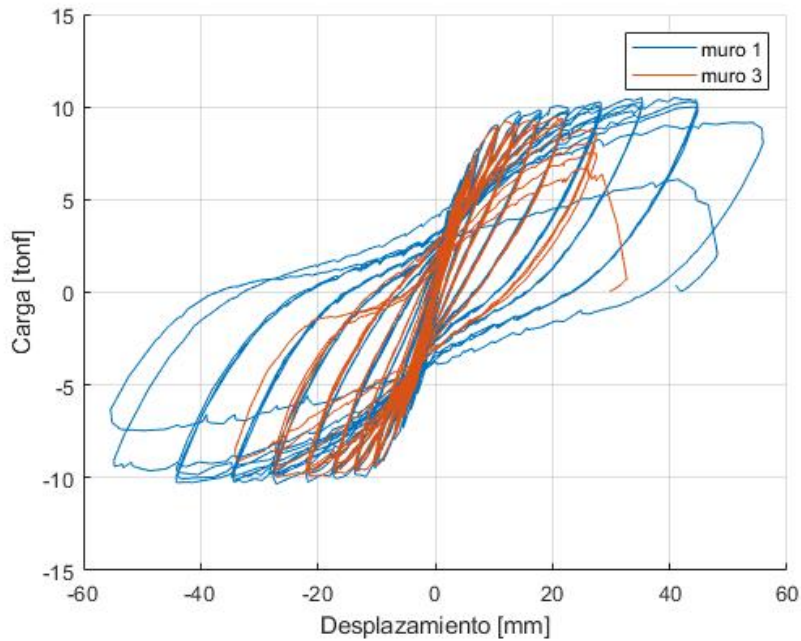


Figura 4.43: Comparación muro 1 y 3

En la figura 4.44 podemos ver la comparación entre el muro 3 de reemplazo de armadura por fibra y el muro sin fibra y sin confinamiento evaluado por Cifuentes B. 2023 y Rodo F. 2023 en estos podemos ver que ambos llegan a niveles de deriva similares si vemos solo los resultados del lado negativo (ya que el lado positivo del muro sin confinamiento ni fibra presento problemas), podemos ver que en el primer ciclo del drift 2,5 el muro 3 llego hasta cerca de 34 mm de desplazamiento de techo en cambio el muro sin confinamiento y sin fibra llego hasta 40 mm aproximadamente en donde fallo y la carga cayo, respecto a la carga ambos muros llegaron a una capacidad de 10 tonf, por lo cual la cantidad de fibra es menor a la necesaria para reemplazar la armadura vertical y horizontal del muro donde el muro 3 posee cerca de 1,35 veces el volumen de fibra sobre el volumen de las barras.

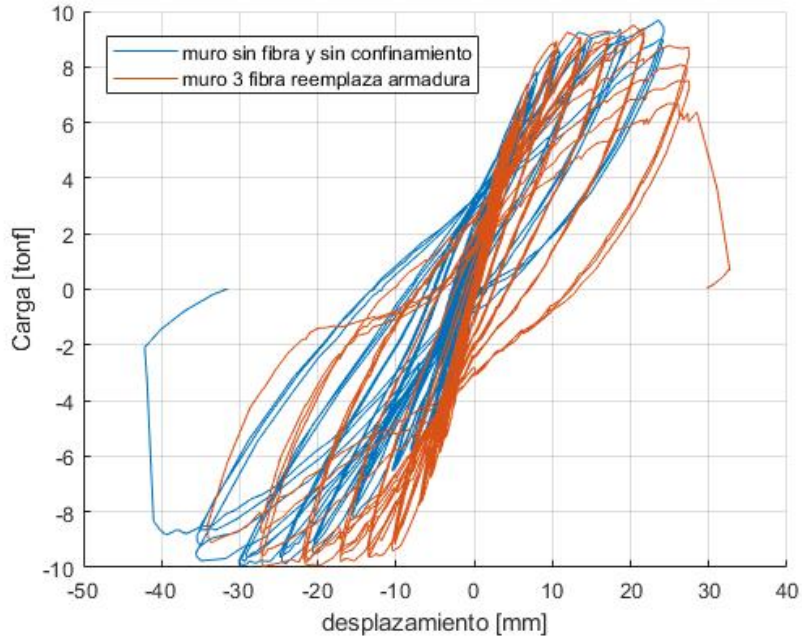


Figura 4.44: Comparación muro 3 y muro sin fibra y sin confinamiento

En la figura 4.45 podemos observar la comparación entre el muro 2 con confinamiento y fibra con el muro con fibra y sin confinamiento (Rodo F. 2023 ) si comparamos solo el lado negativo, ya que el lado positivo presenta menores niveles de carga por los cortes de barra en el muro 2, vemos que ambos muros se comportan de manera similar llegando a los mismos niveles de drift siendo el muro 2 el que presenta un desplazamiento levemente mayor esto debido a al presencia de el confinamiento de borde el cual fue mayor a pesar de los cortes de barra anticipado.

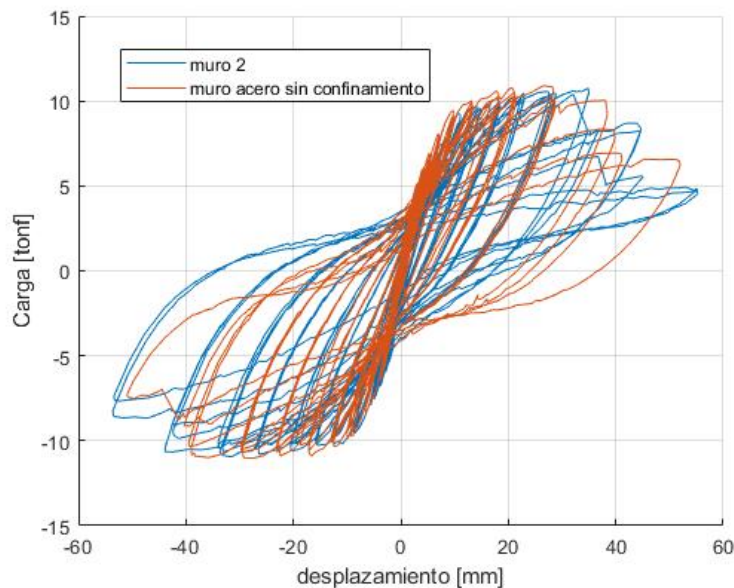


Figura 4.45: Comparación muro 2 y muro con fibra sin confinamiento

# Capítulo 5

## Conclusiones

En el ámbito de la construcción, los muros de hormigón armado con fibras han sido una alternativa prometedora debido a su resistencia y durabilidad. Sin embargo, en Chile, su adopción ha sido limitada, especialmente en el caso de muros sin confinamiento. Este fenómeno plantea una serie de desafíos y oportunidades para mejorar la eficiencia y la seguridad de las estructuras construidas en el país. Los muros de hormigón sin confinamiento, a pesar de su construcción aparentemente robusta, presentan vulnerabilidades significativas frente a cargas laterales y sismos. Esta falta de confinamiento expone a las fibras del hormigón a tensiones extremas, lo que puede resultar en fallas catastróficas durante eventos sísmicos. Para abordar este problema, se ha demostrado que el confinamiento de los muros con fibras mejora significativamente su capacidad de resistencia ante esfuerzos sísmicos y cargas laterales. El confinamiento se logra mediante la adición de refuerzos verticales y horizontales en los bordes del muro, lo que aumenta su capacidad de deformación y resistencia. Los muros con fibra y confinamiento representan una innovación en la construcción que combina materiales con técnicas de confinamiento para mejorar la resistencia y la durabilidad de las estructuras. El uso de fibras, como la fibra de acero, proporciona una mayor resistencia a la tracción y flexión en comparación con los materiales tradicionales como el concreto. Estas fibras se pueden integrar en la matriz del concreto para reforzarlo y prevenir la formación de grietas, aumentando así la capacidad de carga y la vida útil del muro. El confinamiento, por otro lado, implica el uso de elementos que envuelven o rodean la estructura, como barras de refuerzo o mallas metálicas, para proporcionar un apoyo adicional y evitar la expansión lateral del concreto durante cargas sísmicas u otras tensiones externas. Es por esto que estudiar su comportamiento al combinar ambos casos y algunas opciones alternativas resulta interesante.

En esta memoria se estudiaron 3 probetas de muro con las mismas dimensiones de 1,15 m de alto, 0,6 m de ancho y 0,1 m de espesor, la primera con hormigón tradicional y confinamiento en los bordes del muro que funcionara como muro de control de comparación con los otros muros, la segunda probeta de muro se construyó con confinamiento en los bordes de muro y además se le agregó fibra en un 0,8 % de dosificación en todo el muro, la tercera fue hecha sin confinamiento en los bordes y además se le quitó la armadura vertical y horizontal en la zona de muro reemplazando el volumen de las barras extraídas por fibra en la zona de muro entregando una dosificación de 0,79 % de fibra, estas se montaron en forma de sándwich con las fundaciones y vigas prefabricadas que funcionan por roce con el muro. Los 3 muros

se ensayaron cíclicamente para el mismo protocolo de ensayo y carga axial de 16 tonf.

Los resultados del muro 1 fueron los esperados según los estudios anteriores llegando hasta un drift del 4 % y una carga máxima de 10,6 tonf en el drift 3,2 % con un modo de falla a flexo-compresión, presentando pandeo de las barras en ambos bordes inferiores del muro llegando a la capacidad de estas, además de el corte de los estribos de esa zona. Los resultados del muro 2 que a pesar del corte de barra anticipado por efectos externos ocurridos al taladrar el muro, este fue el que entregó una mayor resistencia de 11 tonf y llegó igualmente hasta un desplazamiento de techo de 4 %, este ya que tenía la misma armadura que el muro 1 pero incluía fibra, tuvo el mismo modo de falla dúctil con mayor cantidad de falla a flexión y compresión en los bordes inferiores del muro, pero en el lado en que ocurrió el corte de barra en el drift 2,5 % la carga cayó a 8 tonf lo que hizo que su disipación de energía fuera menor esto además provocó que se cortaran 2 barras más cayendo la carga en cada uno de los cortes por lo que no entregó una curva de histéresis asimétrica. Se deduce que pequeñas alteraciones en una barra de refuerzo en el confinamiento como el ocurrido en este caso pueden producir el corte anticipado de la barra, dañando la estructura en esa zona por lo cual es crucial el buen manejo de los materiales y más aun en la zona crítica del muro (en los bordes inferiores). El muro 3 a diferencia de los muros anteriores llegó hasta un drift del 2,5 % llegando hasta un desplazamiento de techo del 34 mm el cual falló por corte por una grieta en el centro del muro de 3 mm de espesor aproximadamente, en este muro la carga máxima fue de 10 tonf y fue en el ciclo del 2 %. A largo plazo por el menor costo de la fibra de acero además del menor gasto de personal especializado, transporte, corte y doblado de barras extras hace que la adición de fibra sea una alternativa económica pero se debe tener en cuenta la trabajabilidad del hormigón ya que resultó con deficiencias en el muro 2 al poseer confinamiento y fibra lo que por el poco espacio provocó que no llegara hormigón a todas las zonas del muro.

# Bibliografía

[1] K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Mater. Des.* 31 (2010) 2604–2615, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>

[2] Wasim Abbass, M. Iqbal Khan, Shehab Mourad, .Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 2018.

[3] Concha F., CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO DRAMIX 3D 65/35”, tesis para optar al título de ingeniero civil Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 2022

[4] Zheng Dang, Xingwen Liang, Mingke Deng, Cyclic behavior of shear walls with HPFRCCs in the inelastic deformation critical region,” *THE STRUCTURAL DESIGN OF TALL AND SPECIAL BUILDINGS*, 2016.

[5] Instituto Nacional de Normalización. (2016). NCh 170. Of.2016 : Hormigón: requisitos generales (NCh 170). Santiago, Chile: INN, 2016

[6] Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan, ”Design of Concrete Structures,” 14th Edition, 2017.

[7] Bekaert, Brochure Dramix steel fiber concrete reinforcement, Reinforcing the future Dramix, 2012.

[8] Wallace J. W., Massone L., ”Load-Deformation Response of Slender Reinforced Concrete Walls,” *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 2004

[9] Massone, L. M., Bonelli, P., Lagos, R., Lüders, C., Moehle, J., & Wallace, J. W. (2012). Seismic design and construction practices for RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1).

[9] Massone, L. M., Bonelli, P., Lagos, R., Lüders, C., Moehle, J., Wallace, J. W., ”Seis-



mic design and construction practices for RC structural wall buildings, *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1), 2012.

[10] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, properties and materials*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 2006.

[11] Zhang Hongmeia, Chen Zhi Yuana, "Seismic performance comparison and evaluation for shear walls with fiber reinforced concrete, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou.

[12] Singh, H., "Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design." DOI: 10.1007/978-981-10-8466-5

[13] Pradeep Bhargava, Umesh K. Sharma, Surendra. K. Kaushik, "Compressive Stress-Strain Behavior of Small Scale Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete Cylinders," *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 4, 2005.

[14] Gregor Fischer, Victor C. Li, "Deformation Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions," *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, 2003.

[15] Rodo F., *RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MUROS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO ANTE CARGAS CÍCLICAS*, tesis para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 2023.

[16] Cifuentes B., *RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MURO DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE PVA ANTE CARGAS CÍCLICAS*, tesis para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 2023.

# .1. Anexo

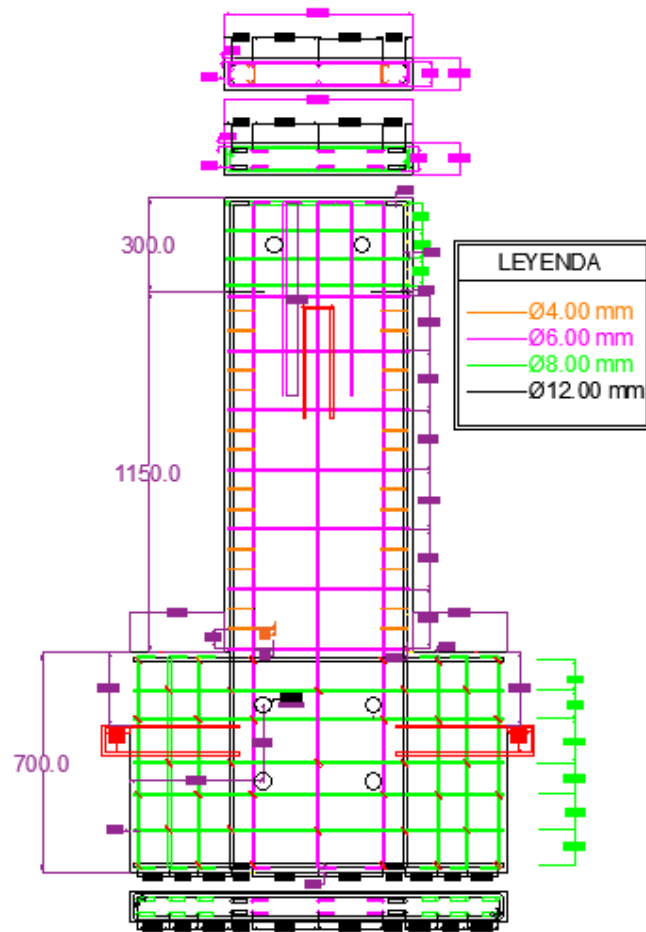


Figura 1: Diseño armadura muro 1 y 2

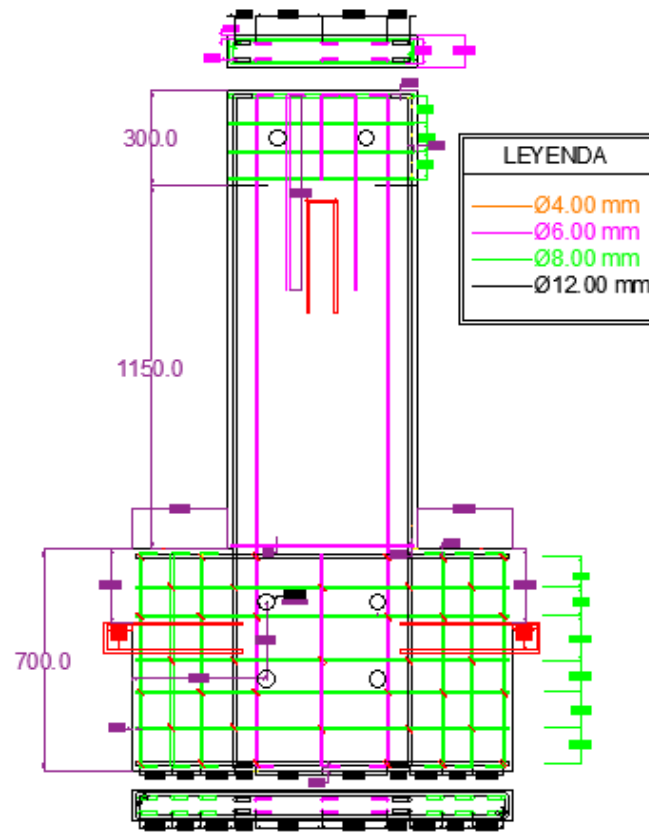


Figura 2: Diseño muro 3