



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

RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO CON FIBRAS DE ACERO ANTE CARGAS CÍCLICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO ANDRÉS RODÓ GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
AUGUSTO HOLMBERG

Este trabajo de enmarca en el Proyecto FONDECYT N° 1200023

SANTIAGO DE CHILE
2023

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia
POR: Francisco Andrés Rodó González
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: Leonardo Massone

RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MUROS DE HORMIGÓN ARMADO CON FIBRAS DE ACERO ANTE CARGAS CÍCLICAS

La manera característica de construcción en Chile es mediante un sistema de muros estructurales, en los cuales tras el terremoto del año 2010 quedaron en evidencia falencias de diseño que provocaron considerables daños estructurales. Por lo anterior, es que surgen desafíos dentro de la ingeniería que buscan diseños alternativos o complementarios al detallamiento de borde, para mejorar la capacidad de resistencia y ductilidad de los sistemas de muros estructurales de hormigón. En particular, en la presente memoria se estudió los efectos del uso de fibras de acero DRAMIX® 3D 65/35 con una cuantía de 0,8% en la mezcla de hormigón en probetas de muros sin detallamiento de borde. Esto se realizó a través de dos ensayos con fundaciones reutilizables, uno con diseño sin fibras y otro de diseño alternativo con fibras de acero, donde cada muro se unió a las fundaciones mediante una serie de postensados de barra. Los ensayos consistieron en una aplicación de cargas cíclicas mediante un actuador horizontal, donde se evidenció una mejor respuesta global en el diseño con fibras de acero en todos los parámetros analizados, llegando a una deriva del 4% en contraposición al 2% que obtuvo el muro sin fibras. Respecto a la capacidad de carga, se observó una leve mejora en el muro con fibras de acero, donde se mostró una capacidad de 11,3 [tonf] en comparación a las 10 [tonf] que obtuvo el muro sin fibras. Además, el muro con fibras exhibió una respuesta más dúctil, superando en un 64% al muro sin fibras, con una disipación de energía un 26,5% mayor. En cuanto a la progresión de daños, en el muro con fibras de acero se observó una formación de grietas más gradual. Por otra parte, los resultados que se observaron en las deformaciones unitarias en ambos ensayos no fueron confiables, debido a que se vieron influenciados por la ubicación en que se instalaron los sensores, ya que registraron desplazamientos mayores a causa del movimiento muro-fundación. Por último, se dejaron recomendaciones para estudios futuros con esta metodología de ensayo.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis profesores guía y co-guía, Leonardo Massone y Fabian Rojas, por guiarme a lo largo de este proceso, brindando apoyo y experiencia sin la cual este trabajo no habría sido posible.

Quiero agradecer también al profesor Pedro Soto quien estuvo a lo largo de todo el proceso experimental siendo de vital apoyo para el desarrollo de trabajo en el laboratorio.

Agradezco además a Bryan y Sebastián quienes fueron mis compañeros en el diseño, construcción y montaje de los tres ensayos realizados y con quienes compartí lo último de mi etapa universitaria llevándome buenos recuerdos.

Asimismo, estoy profundamente agradecido con los amigos que hice durante este largo periodo por su constante apoyo y motivación a seguir superándome. Al equipo de handball por las enseñanzas y risas.

También quiero agradecerle a mi novia Sofia quien ha estado a mi lado en todo momento, por su amor, cuidado, paciencia y apoyo incondicional.

Por último, quiero expresar mis más profundos agradecimientos a mis papás Alger y Ma Gloria quienes me han apoyado incondicionalmente durante toda la vida, en altos y bajos, alentándome en los momentos más difíciles. A mis hermanos por preocuparse constantemente de mí y ser mi apoyo directo.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	4
1.2.1.	Objetivo General	4
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.3.	Alcances	4
1.4.	Estructura de la memoria	5
CAPÍTULO 2	MARCO TEÓRICO	6
2.1.	Implicancia del diseño de muros sin detallamiento de borde	6
2.2.	Propiedades del Hormigón y Antecedentes del uso de fibras	8
2.3.	Caracterización de las fibras de acero.....	8
2.4.	Dosificación.....	11
CAPÍTULO 3	DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS.....	14
3.1.	Geometría y detallamiento de probetas.....	14
3.2.	Caracterización de materiales	16
3.2.1.	Acero	16
3.2.2.	Hormigón.....	18
3.3.	Componentes de la mezcla utilizada.....	20
3.3.1.	Granulometría del hormigón	20
3.3.2.	Fibra de Acero	22
3.4.	Construcción de las probetas	22
3.4.1.	Etapas 1: Construcción de Enfierradura	22
3.4.2.	Etapas 2: Construcción de Moldaje	23
3.4.3.	Etapas 3: Hormigonado	24
CAPÍTULO 4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	28
4.1.	Laboratorio de Estructuras.....	28

4.2. Montaje Experimental	29
4.2.1. Actuator Horizontal	30
4.2.2. Gatos Hidráulicos	32
4.2.3. Postensado de Barras.....	32
4.2.4. Sistema de Carga Axial	33
4.2.5. Marco de Acero y Arriostramiento Lateral	34
4.2.6. Cuñas de Corte	34
4.2.7. Instrumentación	35
4.2.7.1. Transformadores Diferenciales de Variación Lineal (LVDT)	35
4.2.7.2. Sistema de Adquisición de Datos.....	38
4.2.7.3. Fotogrametría	39
4.2.8. Ensayo Experimental	40
 CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	 41
5.1. Respuesta global sistema de fundaciones reutilizables	43
5.2. Respuesta global Muro sin fibras de acero	43
5.2.1. Desplazamiento de Corte y Flexión.....	45
5.2.2. Deformaciones unitarias en altura.....	46
5.2.3. Evolución de daño Muro sin fibras.....	46
5.3. Respuesta global Muro con fibras de acero	51
5.3.1. Desplazamiento de Corte y Flexión.....	52
5.3.2. Deformaciones unitarias en altura.....	52
5.3.3. Evolución de daño Muro Alternativo	53
5.4. Análisis Comparativo	58
5.4.1. Resistencia y Rigidez	59
5.4.2. Deriva de techo y Disipación de energía	60
 CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....	 62
 RECOMENDACIONES FUTURAS	 63
 BIBLIOGRAFÍA 64	
 ANEXOS.....	 65

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Diámetro de barras de acero usadas en el muro.	14
Tabla 3.2 Cuantías.	14
Tabla 3.3 Dimensiones de las zonas del muro.	15
Tabla 3.4 F_y de las barras utilizadas en el ensayo.	16
Tabla 3.5 Resistencia $f'c$ cilindros de hormigón Muro Control.	19
Tabla 3.6 Resistencia $f'c$ cilindros de hormigón Muro Alternativo.	19
Tabla 3.7 Componentes que forman las mezclas de hormigón.	20
Tabla 3.8 Dimensión de la apertura del tamiz.....	20
Tabla 3.9 Resultado análisis granulométrico del árido.	21
Tabla 3.10 Características de la fibra de acero.....	22
Tabla 4.1 Carga Axial Impuesta.	34
Tabla 5.1 Protocolo de Carga Nominal Modificado.	41
Tabla 5.2 Desplazamientos Sistema Muro-Fundación.	43
Tabla 5.3 Desplazamientos Reales.	45
Tabla 5.4 Resistencia Máxima MC y MA.	59

Índice de Figuras

Figura 1.1 Falla de muro por falta de detallamiento de borde.	2
Figura 1.2 Fibras de acero Dramix 3D 65/35.	3
Figura 1.3 Montaje Ensayo Experimental.	3
Figura 2.1 Plano en planta Edificio Tajamar (Duque, 2011).	6
Figura 2.2 Típica falla de corte en muros.(Massone, 2013).	7
Figura 2.3 Refuerzo de muro en el borde - (a) vista general, (b) fractura y pandeo (Massone, 2013).	7
Figura 2.4 Fibras 5D, 4D y 3D (Bekaert, 2012).	9
Figura 2.5 Ensayo de Tracción sobre las fibras Dramix (Bekaert, 2012).	9
Figura 2.6 Ensayo pull-out para fibras 5D, 4D y 3D (Bekaert, 2012).	9
Figura 2.7 Ensayo a compresión para mezcla con árido fino (Concha, 2023).	10
Figura 2.8 Ensayo a tracción directa para mezcla con árido fino (Concha, 2023).	10
Figura 2.9 Influencia del contenido de agua y la proporción de áridos sobre la consistencia (Moreno y Cánovas, 1997).	12
Figura 2.10 Resistencia a compresión y los parámetros estadísticos de las muestras. (Moreno Almansa & Cánovas, 1997).	13
Figura 3.1 Disposición de la armadura.	15
Figura 3.2 Gráfico Tensión-Deformación barras 6 [mm].	17
Figura 3.3 Gráfico Tensión-Deformación barras 8 [mm].	17
Figura 3.4 Gráfico Tensión-Deformación barras 12 [mm].	18
Figura 3.5 Hormigón premezclado BEMEZCLA.	18
Figura 3.6 Tamiz de latón.	20
Figura 3.7 Fibras de acero Dramix 3D 65/35.	22
Figura 3.8 Dobladora de Fierros y Construcción de la Armadura.	23
Figura 3.9 Moldaje y Enfierradura.	24
Figura 3.10 Betonera prestada por el IDIEM.	25
Figura 3.11 Uso de la betonera para hormigonado.	25
Figura 3.12 Fibras de acero previo al enjuague.	26
Figura 3.13 Vertido y vibrado del hormigón.	26
Figura 3.14 Nidos observados en el Muro sin fibras luego de quitado el moldaje.	27
Figura 4.1 Plano en planta Laboratorio Arturo Arias.	28

Figura 4.2 Muro de Reacción y Puente Grúa.....	29
Figura 4.3 Losa de Reacción.	29
Figura 4.4 Montaje Experimental.	30
Figura 4.5 Actuador Horizontal.	30
Figura 4.6 Rotulas de conexión (a) Muro - Actuador, (b) Muro de Reacción – Actuador.....	31
Figura 4.7 Postensado de barras verticales, Fundación - Losa de Reacción.	32
Figura 4.8 Postensado de barras horizontales, Viga de transferencia – Muro.	33
Figura 4.9 Carga axial.....	33
Figura 4.10 Cuñas de Corte.	35
Figura 4.11 Componentes sensor LVDT.....	36
Figura 4.12 Esquema ubicación de los sensores según Muro Con Fibras de Acero.	38
Figura 4.13 Equipos para conexión de sensores LVDT.	39
Figura 5.1 Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural (Wallace y Massone, 2004).	42
Figura 5.2 Curva carga-desplazamiento Muro sin fibras.....	44
Figura 5.3 Contribuciones de Desplazamiento por Flexión y Corte Muro sin fibras.....	45
Figura 5.4 Deriva 1,0% lado Este, Peak Este.....	47
Figura 5.5 Evolución de grietas, segundo ciclo deriva 1,6% (peak Oeste).	47
Figura 5.6 Evolución de grietas en el lado Oeste. deriva 1,25% y luego deriva 1,6% (peak Este). 48	
Figura 5.7 Grietas causadas por pandeo en tercer ciclo de deriva 1,6% (peak Este).	48
Figura 5.8 Grietas primer ciclo deriva 2,0% (peak Este).....	49
Figura 5.9 Base muro NORTE al término del ensayo.....	49
Figura 5.10 Base muro SUR al término del ensayo.	50
Figura 5.11 (a) Coronamiento lado Este, pandeo de barras longitudinales - (b) Coronamiento lado Oeste, agrietamiento. Deriva 2,0%.	50
Figura 5.12 Curva carga-desplazamiento Muro con fibras de acero.	51
Figura 5.13 Contribuciones de Desplazamiento por Flexión y Corte Muro con fibras.	52
Figura 5.14 Primer ciclo 0,75% (peak Oeste).....	53
Figura 5.15 Termino de la deriva 2,0% (Centro).....	54
Figura 5.16 (a) Lado Oeste - (b) Lado Este. Deriva 2,5%.	54
Figura 5.17 Lado Este, tercer ciclo 2,5% (peak Oeste).	55
Figura 5.18 Lado Oeste, tercer ciclo 2,5% (peak Este).	55
Figura 5.19 Perdida recubrimiento lado Este, deriva 3,2%.....	56
Figura 5.20 Pandeo y corte de barras longitudinales, deriva 4,0%.	57

Figura 5.21 Base Muro al término del ensayo, lado Norte.	57
Figura 5.22 Comparación Curvas Carga-Desplazamiento Muro Sin Fibras v/s Muro Con Fibras.	58
Figura 5.23 Comparación Curvas de Rigidez Muro sin fibras y Muro con fibras.	59
Figura 5.24 Energía Disipada MC y MA.	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Durante la historia de la ingeniería en Chile, el hormigón ha sido un componente sumamente importante para la construcción y diseño, siendo este un material con excelente resistencia frente a la compresión, pero muy débil a tracción. Es por esta razón que se ha incorporado el acero de refuerzo dentro de los elementos estructurales de hormigón, para así mejorar la ductilidad del elemento y que no falle de manera frágil.

En Chile, la construcción de edificios de cuatro o más pisos se ha basado predominantemente en el sistema de muros estructurales que trabajan a corte. En las últimas décadas, se han producido cambios significativos en la forma en que se construyen los edificios en el país, donde la cantidad de pisos en las edificaciones ha aumentado, mientras que el grosor de los muros ha disminuido. En este contexto, es común emplear muros longitudinales ubicados a lo largo de un corredor central (Massone et al., 2012). Además, se ha adoptado la práctica del detallamiento de borde en los muros, que consiste en reforzar la zona cercana a los bordes para mejorar la resistencia y la capacidad de respuesta de estos elementos frente a diversas fuerzas y sollicitaciones (Massone, 2013).

Durante el terremoto de febrero de 2010, se reveló un aspecto crítico en la vulnerabilidad de ciertas estructuras: los muros que sufrieron los peores daños fueron aquellos que presentaron una deficiente práctica de detallamiento de borde o una mala colocación del refuerzo como se observa en la Figura 1.1. Este evento sísmico destacó la importancia crucial del detallamiento de borde en muros y columnas, ya que dicha medida de refuerzo es fundamental para mejorar la resistencia y capacidad de carga de las estructuras ante fuerzas laterales generadas por sismos. Aquellos muros que carecían del refuerzo adecuado cerca de sus bordes fueron más susceptibles a la concentración de tensiones en esas áreas, lo que resultó en agrietamientos y, en algunos casos, colapsos catastróficos. Es por esto por lo que después del 2010 se actualiza la norma NCh433 para dar especial énfasis al detallamiento de borde (Massone, 2013).



Figura 1.1 Falla de muro por falta de detallamiento de borde.

Como respuesta a la necesidad de mejorar la resistencia y ductilidad de los elementos estructurales de hormigón, la ingeniería ha explorado diversas soluciones innovadoras. Una de ellas es la incorporación de fibras de acero en el hormigón, un aditivo que ha demostrado tener un impacto significativo en el comportamiento de las estructuras. La adición de fibras de acero al hormigón proporciona una mejora en la resistencia a la tracción y en la capacidad de absorber energía, lo que contribuye a aumentar la ductilidad del material y evitar un fallo frágil durante eventos sísmicos o cargas cíclicas (Concha, 2023).

Esta técnica ha sido ampliamente estudiada y utilizada en diversas aplicaciones estructurales, tales como pavimentos, losas, vigas y elementos de muros. En el contexto de muros estructurales, el uso de fibras de acero representa una prometedora alternativa al detallamiento de borde convencional, ya que estas fibras se distribuyen homogéneamente a lo largo de todo el elemento de hormigón, proporcionando una mayor resistencia a lo largo de toda su extensión.

En este contexto, la presente tesis busca explorar y evaluar el potencial de las fibras de acero como una opción viable para reemplazar o complementar el detallamiento de borde convencional en muros estructurales de hormigón. El objetivo principal es investigar si la incorporación de fibras de acero puede brindar una mejora significativa en la resistencia y ductilidad de los muros, especialmente en aquellos casos donde el detallamiento de borde tradicional pueda resultar complicado de implementar o insuficiente para satisfacer los requerimientos sísmicos.

Es por esto que esta tesis se propone como un estudio pionero en la construcción y evaluación de tres muros de hormigón armado que se distinguen por su enfoque sin detallamiento de borde. Este trabajo se realiza con dos alumnos más, quienes están encargados del diseño del montaje experimental y del tercer muro. Para esta tesis se compartirán los datos obtenidos del primer

muro sin fibras con Bryan Cifuentes y solo se mostrarán datos del primer y segundo muro (Sin fibras de acero y con fibras de acero), mientras que los datos del tercer muro (Con fibras de PVA) serán trabajados por B.Cifuentes. En este contexto, se lleva a cabo la construcción de dos muros: uno siguiendo un diseño convencional, alineándose con las prácticas tradicionales de la industria de la construcción, mientras que el otro presenta un diseño alternativo innovador. Este último muro incorpora un elemento crucial: una cuantía del 0,8% de fibras de acero en la mezcla de hormigón. Para llevar a cabo los ensayos de estos muros, se diseña un sistema novedoso que utiliza fundaciones reutilizables. Estas fundaciones serán postensadas, creando una unión sólida y empotrada con los muros, lo que permite someterlos a rigurosas pruebas y analizar su comportamiento estructural de manera detallada.



Figura 1.2 Fibras de acero Dramix 3D 65/35.



Figura 1.3 Montaje Ensayo Experimental.

El objetivo principal de los ensayos es evaluar cómo la incorporación de fibras de acero puede afectar la resistencia y la ductilidad de los muros, especialmente en ausencia de un detallamiento de borde tradicional. Al comparar los resultados obtenidos de ambos muros, se puede determinar si la adición de fibras de acero es una opción efectiva y viable para mejorar la capacidad de resistencia y ductilidad de los muros ante cargas cíclicas y eventos sísmicos.

Mediante este enfoque experimental, la tesis busca contribuir al conocimiento y comprensión de cómo las fibras de acero influyen en el comportamiento estructural de los muros de hormigón y la posibilidad de servir como un reemplazo o complemento adecuado al detallamiento de borde en ciertos casos. Los resultados de estos ensayos ofrecen valiosas perspectivas para el diseño y la construcción de estructuras más seguras y resistentes frente a fuerzas sísmicas y otras sollicitaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Estudiar la respuesta experimental de muros estructurales de hormigón armado con fibras de acero Dramix 3D 65/35, ante cargas cíclicas. De esta manera establecer la manera en la que influyen las fibras en la capacidad de deformación, ductilidad y disipación de energía del elemento.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar dos probetas de muro, una con fibras de acero Dramix 3D 65/35 y la otra sin estas.
- Definir el montaje para los ensayos de cargas cíclicas del muro.
- Diseño y construcción de los muros con y sin fibra de acero.
- Montaje del ensayo para ambas probetas de muro.
- Cuantificar la variación de capacidad de carga, ductilidad del hormigón y desplazamientos en el muro sin fibras de acero y el muro con fibras de acero.

1.3. Alcances

El trabajo de título consiste en construir y ensayar dos probetas de muro de hormigón armado. Ambos muros son construidos sin detallamiento de borde, uno confeccionado de manera tradicional, sin fibras de acero, mientras que al otro se le añaden fibras de acero. Luego ambos son ensayados ante cargas cíclicas.

Para esto, la memoria comienza con una revisión bibliográfica. Esta consiste en la lectura de una variedad de artículos técnicos relacionados con el tema de estudio. En paralelo se avanza en el diseño y montaje de la etapa experimental en el laboratorio Arturo Arias, ubicado en Plaza Ercilla 833, en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en la comuna de Santiago, Chile. El trabajo consiste en la cotización de materiales, mano de obra y construcción de las probetas, que luego son ensayadas en el mismo laboratorio.

1.4. Estructura de la memoria

En esta sección, se proporciona una descripción detallada de la estructura de este informe de memoria. Este documento consta de seis capítulos, cada uno con un propósito específico. En su inicio, se encuentra una tabla de contenidos donde se señala la disposición de los capítulos, tablas y figuras.

El primer capítulo comprende la introducción y la motivación que lleva a seleccionar este tema de estudio. También se detallan los objetivos que se pretenden abordar en esta memoria y se presenta su estructura general.

En el segundo capítulo, se encuentra el marco teórico, donde se exponen los antecedentes recopilados a partir de la literatura de trabajos previos relacionados o similares. Estos antecedentes sirven de base para comprender qué parámetros de estudio son relevantes en lo que respecta al detallamiento de borde y el uso de fibras de acero.

El tercer capítulo se centra en el diseño y descripción de la probeta. Aquí se expone la geometría de la probeta de muro, se detalla el diseño de la armadura utilizado y se caracterizan los materiales empleados en el estudio.

El cuarto capítulo se dedica a la metodología experimental. En este apartado, se describe en detalle la metodología empleada para llevar a cabo el estudio, incluyendo los procedimientos utilizados en el montaje de los ensayos, así como los materiales y equipos ocupados para registrar los datos.

El quinto capítulo se enfoca en la presentación de los resultados. Aquí se presentan y describen los resultados obtenidos en los ensayos en términos de capacidad, ductilidad y desplazamientos de los muros.

Finalmente, el sexto capítulo se centra en las conclusiones. En esta sección, se resumen y analizan los principales hallazgos experimentales obtenidos para ambos muros, brindando una visión general de los resultados del estudio.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Implicancia del diseño de muros sin detallamiento de borde

En Chile la manera predominante de construcción en edificios de cuatro o más pisos es mediante un sistema de muros estructurales que trabajan a corte, siendo el porcentaje del área de muros en comparación al área de suelo un 3% en cada dirección principal. Durante el periodo de las últimas décadas, la manera en que se construyen edificaciones ha cambiado en varios aspectos. A pesar de que el área de muros se ha mantenido en el tiempo, los edificios modernos han aumentado la cantidad de pisos, de 15 a 25 aproximadamente, y han disminuido el grosor de muros. Este incremento en los niveles resulta en mayores cargas axiales en edificios modernos (Massone, 2013).

Otra característica de la construcción moderna es el uso de muros longitudinales al costado de un corredor central que forma una columna vertebral y muros perpendiculares, como se observa en la Figura 2.1. Así, los muros siempre tienden a quedar conectados formando una T o una L (Massone et al., 2012).

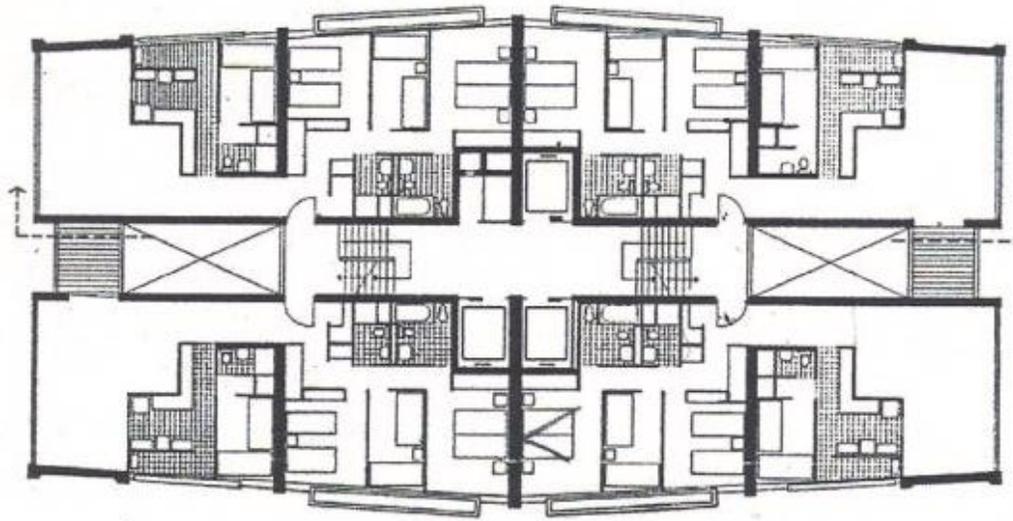


Figura 2.1 Plano en planta Edificio Tajamar (Duque, 2011).

Para el terremoto 8,8 [Mw] ocurrido el 27 de febrero del 2010, la mayor parte del daño observado se encontraba principalmente en estas edificaciones modernas, donde sus fallas típicas se observan en la Figura 2.2, ya que la combinación de gran carga axial, con relativamente harto desplazamiento lateral de muro debido al terremoto, y un deficiente detallamiento de borde, como se muestra en la Figura 2.3, resultó en el daño de los muros (Massone, 2013).



Figura 2.2 Típica falla de corte en muros. (Massone, 2013).

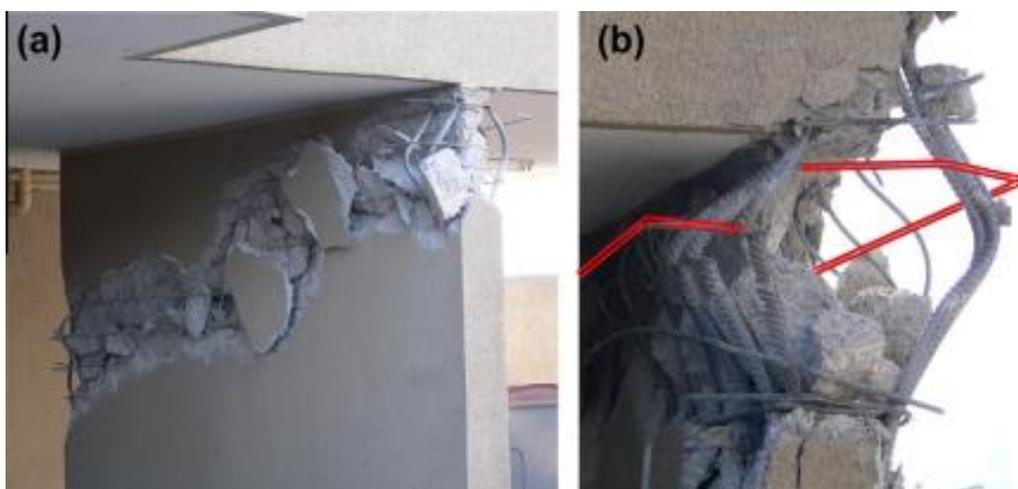


Figura 2.3 Refuerzo de muro en el borde - (a) vista general, (b) fractura y pandeo (Massone, 2013).

El daño observado producido por el terremoto y de la información recopilada en los registros de aceleración, llevaron a la ingeniería en Chile a realizar cambios en las normativas existentes; diseño de hormigón armado (NCh430.Of2008) y diseño sísmico de edificios (NCh433.Of96) (Massone, 2013).

En lo que respecta a las modificaciones en el diseño estándar en hormigón armado, se enfocó en los requisitos para un mejor comportamiento de los muros de hormigón armado, cuyo reemplazo fue el DS N°60 (también una modificación de una versión anterior). El código utiliza el ACI318-08 como código base e incluye modificaciones que se centraron en el diseño especial de muros (Massone, 2013).

Las principales modificaciones fueron (Lagos et al., 2021):

- Se estableció restricciones en la esbeltez de los muros a corte, exigiendo un espesor mínimo de $e \geq h/16$, donde h es la altura de muro.
- Se limita la máxima compresión en los muros a corte, especificando que $P_u \leq 0,3 \cdot f'c \cdot Ag$.
- Se requiere confinamiento de los elementos de borde (espesor $\geq 30\text{cm}$) cuando $\varepsilon_c > 0,003$ para el desplazamiento de techo δ_u .
- Aun cuando se provee el confinamiento, se ha exigido que, en la sección crítica, la deformación máxima del concreto en las paredes, ε_c , se limite a 0.008 debido al desplazamiento del techo, δ_u .
- También se requiere confinamiento en empalmes longitudinales en secciones críticas.

2.2. Propiedades del Hormigón y Antecedentes del uso de fibras

El hormigón es un material ampliamente utilizado en la construcción en todo el mundo. Se obtiene con la mezcla de cemento, arena, grava y aditivos en algunos casos (Nilson et al., 2017). Las propiedades de este varían según la cantidad de sus componentes, un ejemplo sería la relación agua cemento, donde una mayor cantidad de agua facilita su trabajabilidad, pero empeora su resistencia. El hormigón se destaca por su alta resistencia a la compresión, pero mala resistencia a la tracción. Posee baja capacidad de deformación, es por esto que se debe reforzar con elementos de acero para mejorar su ductilidad (Mehta y Monteiro, 2006).

El uso de fibras en el hormigón tiene sus antecedentes en la década de 1960, cuando se iniciaron las primeras investigaciones sobre su potencial para mejorar las propiedades mecánicas del material. En ese momento, se empezaron a utilizar fibras de vidrio para reforzar el hormigón, aunque su uso no se generalizó debido a su alto costo. Fue en la década de 1970 cuando se empezaron a utilizar fibras de polipropileno y nylon para reforzar el hormigón, lo que permitió reducir los costos y ampliar el uso de las fibras en la construcción de diversas estructuras. En la década de 1980, se desarrollaron fibras de acero corrugado, que proporcionaron una mayor resistencia a la tracción y la flexión, lo que permitió mejorar aún más las propiedades mecánicas del hormigón. Desde entonces, se han desarrollado muchos otros tipos de fibras para su uso en el hormigón, y su uso se ha expandido a una amplia variedad de aplicaciones en la construcción (Singh, 2017).

2.3. Caracterización de las fibras de acero

Generalmente, las fibras se agregan al hormigón para mejorar su capacidad de resistencia, ductilidad y tenacidad. La efectividad de un tipo específico de fibras dependerá principalmente de sus características y forma (Lawer *et al.*, 2005). En la actualidad, existen distintos tipos de fibras que se utilizan en la construcción, como las metálicas, sintéticas, de vidrio, naturales y de carbono.

Las fibras de acero en estudio son las Dramix 3D de la empresa Bekaert, primero introduciendo las fibras con un solo gancho (3D Dramix) en 1970 y luego más reciente con un gancho y medio, y dos ganchos (4D y 5D), mostradas en la Figura 2.4, aumentando así su capacidad de carga y ductilidad en el hormigón (Bekaert, 2012).

La ductilidad y la resistencia posterior a la fisura del concreto con fibras de acero se determinan por muchos aspectos diferentes, incluyendo la composición del concreto, la longitud de las fibras y la relación de aspecto l/d (Bekaert, 2012).



Figura 2.4 Fibras 5D, 4D y 3D (Bekaert, 2012).

Aunque las fibras en el hormigón generan ductilidad, su modo de falla puede variar dependiendo de su forma. En la Figura 2.5 se observa que las fibras 3D y 4D fallan por anclaje en la matriz, mientras que las fibras 5D fallan por tracción. Las fibras 4D fallan con más tensión debido a su forma. La resistencia del anclaje de la fibra se puede evaluar a través del ensayo pull-out, mientras que el ensayo a tracción de las fibras permite observar su comportamiento (Bekaert, 2012).

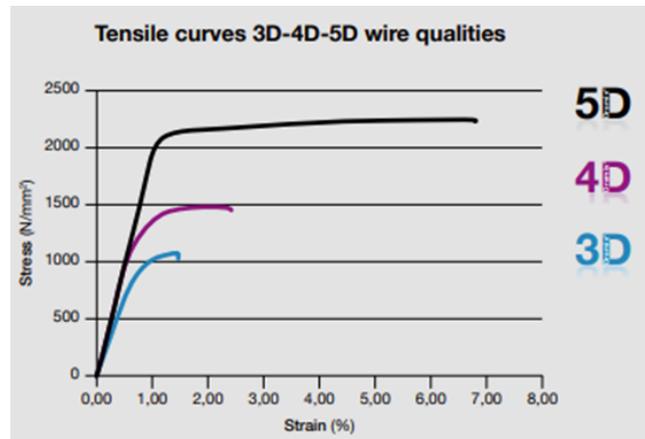


Figura 2.5 Ensayo de Tracción sobre las fibras Dramix (Bekaert, 2012).

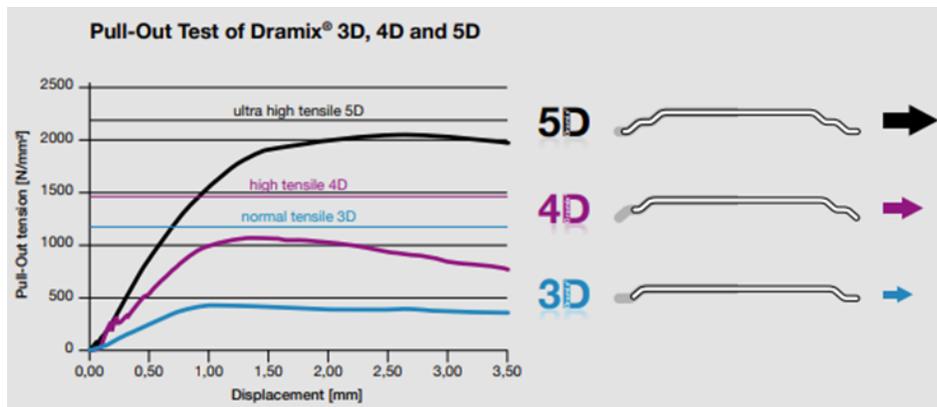


Figura 2.6 Ensayo pull-out para fibras 5D, 4D y 3D (Bekaert, 2012).

Luego, de la Figura 2.6 se desprende que el ensayo pull-out es el que gobierna sobre las fibras Dramix 3D y 4D, mientras que el ensayo a tracción es el que controla a la fibra Dramix 5D (Bekaert, 2012).

Para determinar el tamaño de árido y la cuantía utilizada en esta memoria, se ocupan los resultados obtenidos por Concha (2023), quien trabajo con dos tipos de mezcla de hormigón en probetas cilíndricas, una con árido grueso, la otra con árido fino y tres cuantías distintas de las fibras Dramix 3D 65/35 para cada mezcla. Para este trabajo, se mostrarán solo los resultados obtenidos en la mezcla de árido fino ya que fueron las que dieron mejor resultado, además de que el hormigón premezclado utilizado en este ensayo presenta mayoritariamente áridos finos como se observa más adelante en la Tabla 3.9.

Para el ensayo a compresión y tracción, mostrados en la Figura 2.7 y Figura 2.8 respectivamente, se observa que los mejores resultados se obtuvieron con la cuantía de 1%, por lo que se elige ésta como la cuantía de referencia a utilizar.

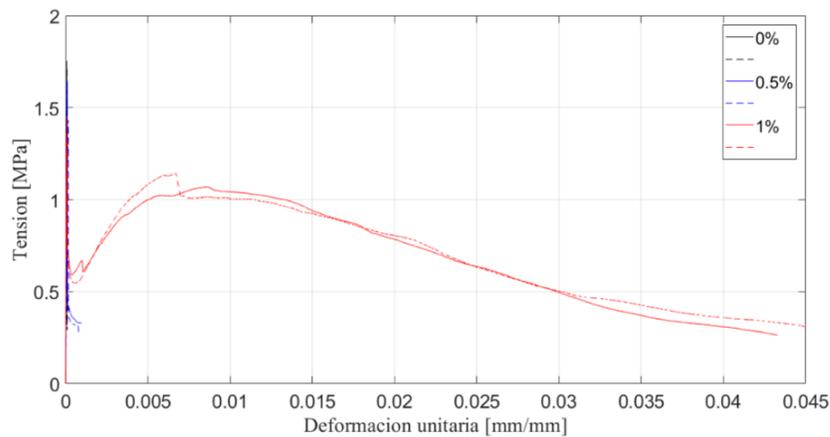


Figura 2.7 Ensayo a compresión para mezcla con árido fino (Concha, 2023).

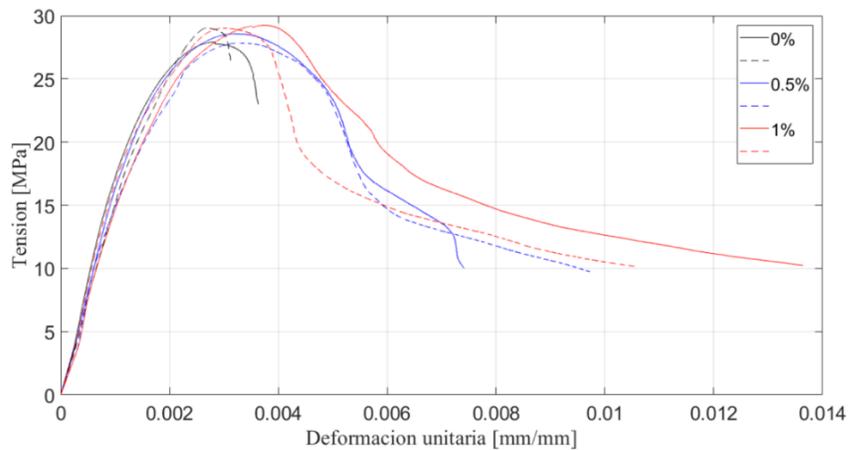


Figura 2.8 Ensayo a tracción directa para mezcla con árido fino (Concha, 2023).

2.4. Dosificación

Para obtener un hormigón con la resistencia deseada, es crucial conocer la dosificación de sus materiales. Principalmente la relación agua/cemento (A/C) la cual está directamente relacionada con la trabajabilidad y resistencia del hormigón, siendo un factor crítico en el diseño y producción de hormigón. Esta relación se refiere a la cantidad de agua utilizada en la mezcla en comparación con la cantidad de cemento. Si la relación A/C es demasiado alta, la mezcla puede ser más fácil de trabajar, pero también puede hacer que el hormigón sea menos resistente y duradero. Por otro lado, si la relación A/C es demasiado baja, la mezcla puede ser difícil de trabajar y puede dar lugar a una mala compactación (Moreno y Cánovas, 1997).

Según el mismo autor, el objetivo de una correcta dosificación de hormigón reforzado con fibras metálicas (HRFA) es conseguir una mezcla que mantenga una docilidad, homogeneidad, durabilidad y resistencia adecuadas a su uso.

Es conveniente favorecer la docilidad del HRFA incrementando la cantidad de finos mediante la incorporación de adiciones activas en la fabricación del hormigón. Esta opción es delicada, pues exige un riguroso control in situ de la adición; dicho control, por otra parte, es obligado en la fabricación del cemento Portland con adiciones. Así pues, es posible fabricar HRFA con contenidos de cemento entre 450 y 300 [kg/m³] (Moreno y Cánovas, 1997).

La adición de fibras no impone ninguna especificación adicional al agua de amasado, pero impone un incremento en el volumen de pasta y, por tanto, en el volumen de agua de amasado por metro cúbico de hormigón (Moreno y Cánovas, 1997).

En la dosificación del hormigón, continúa el mismo autor, un factor crucial a considerar es la relación entre los áridos finos y gruesos. Es importante destacar que el valor máximo de esta relación no está relacionado con el contenido de agua, ya que el cono óptimo, que se logra con una relación A/C mayor y proporciona mayor trabajabilidad, depende únicamente de esta proporción entre los áridos. Por lo tanto, la elección adecuada de la proporción entre los áridos finos y gruesos es fundamental para obtener una mezcla de hormigón con las características de trabajabilidad y resistencia requeridas, como se observa en la Figura 2.9.

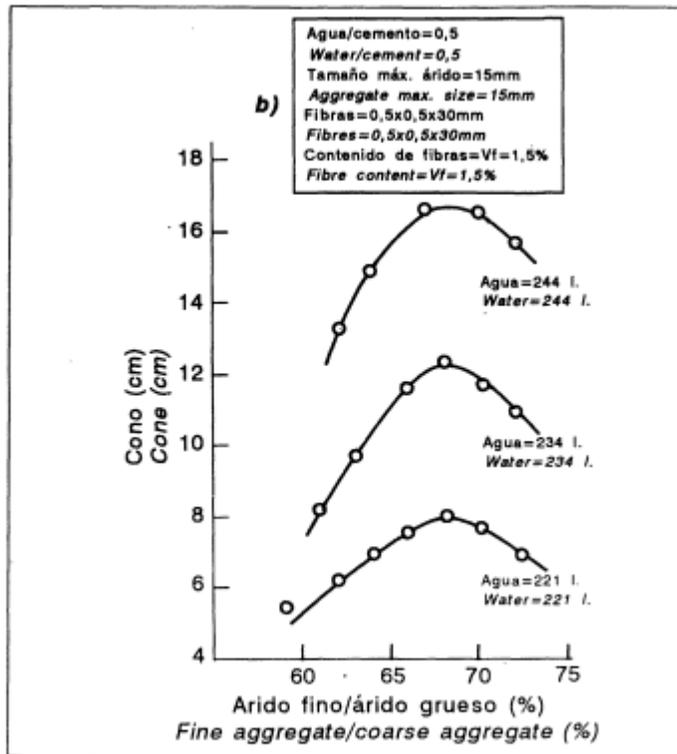


Figura 2.9 Influencia del contenido de agua y la proporción de áridos sobre la consistencia (Moreno y Cánovas, 1997).

La adición de fibras exige una mayor cantidad de pasta, puesto que se incrementa la superficie específica que debe rodear ésta; esto exige una mayor proporción de árido fino para evitar la segregación lo que, a su vez, incrementa la absorción y superficie específica del árido conjunto (Moreno y Cánovas, 1997)

Los resultados de los ensayos de resistencia mecánica a compresión demostraron que, a medida que se aumentaba la cantidad de fibras de acero en el hormigón, la resistencia media también aumentaba. Sin embargo, al mismo tiempo, se observaba un aumento en la dispersión de la resistencia, lo que llevaba a anular este aumento en términos de resistencia. En otras palabras, aunque la adición de fibras de acero aumenta la resistencia media del hormigón, también aumenta su variabilidad, lo que puede tener un impacto negativo en la resistencia global del material. Este hallazgo sugiere que, aunque la adición de fibras de acero puede ser beneficiosa en ciertos casos, es importante tener en cuenta los posibles efectos negativos en la resistencia mecánica del hormigón (Moreno y Cánovas, 1997).

(Compressive strength of SFRC at 28 days)

Cuantía (Quantity) (kg/m ³)	nº de datos (data)	Media muestral (Sample average) (Mpa)	D. típica muestral (D. typical sample) (Mpa)	Coef. de variación (Variation rate) (%)	Resistencia característica (Characteristic resistance) (Mpa)
0	6	44,5	1,51	3,4	42,0
40	6	46,1	1,77	3,8	43,2
80	6	49,5	2,17	4,4	45,9
120	6	50,7	3,20	6,3	45,4

Figura 2.10 Resistencia a compresión y los parámetros estadísticos de las muestras. (Moreno Almansa & Cánovas, 1997).

El éxito del anclaje de las fibras en el hormigón depende en gran medida del diámetro máximo del árido utilizado en la mezcla. Se recomienda que el diámetro máximo del árido no sea mayor a 2/3 o incluso 1/2 de la longitud de la fibra de acero para asegurar un buen anclaje (Moreno y Cánovas, 1997).

Según señala el mismo autor, además de la correcta dosificación del hormigón, los aditivos también juegan un papel importante en la docilidad del material. En el caso del HRFA, los reductores de agua y los superplastificantes son los aditivos más comunes utilizados para mejorar la trabajabilidad. Es importante tener en cuenta que, aunque el uso de aditivos puede aumentar la docilidad del hormigón, no se debe exceder la cantidad de fibras recomendadas debido a otros factores restrictivos, como el apelsonamiento.

Si la falta de trabajabilidad persiste después de ajustar la cantidad de fibras y la granulometría de los áridos, se pueden considerar otras variables, como el volumen de pasta y la relación agua-cemento. Un bajo volumen de pasta se produce cuando hay poca agua y cemento por metro cúbico, lo que puede resolverse mediante una mejor dosificación. Una baja relación agua-cemento puede ser el resultado de la absorción de áridos disponibles en la mezcla, y se puede solucionar con aditivos sin afectar significativamente el comportamiento mecánico del hormigón (Moreno y Cánovas, 1997).

Capítulo 3

Diseño y Descripción de las probetas

El diseño de esta probeta y del montaje de este proyecto se hace en conjunto con dos compañeros más. Entre los tres construimos y ensayamos tres probetas de muro en total, pero en esta memoria solo muestran resultados de dos de esos muros, el muro sin fibras y el muro con fibras de acero. Para poder hacer la comparación de ambos muros, estos serán idénticos en armadura de borde y repartición del alma. Es fundamental definir el diámetro de las barras y la distancia entre los refuerzos verticales y horizontales del alma del muro, así como también el tamaño y la distribución de las barras longitudinales.

3.1. Geometría y detallamiento de probetas

El proyecto incluye la construcción de dos probetas de hormigón armado. Una de ellas se construye utilizando técnicas convencionales, mientras que la otra consiste en una variante en la que el hormigón incorpora fibras de acero. Ambas probetas están compuestas por tres zonas: **zona de fundación** con una altura de 70 [cm], un ancho de 120 [cm] y un espesor de 10 [cm]. La **zona del muro** mide 115 [cm] de altura, 60 [cm] de ancho y 10 [cm] de espesor como se señala en la Tabla 3.3, y está conectada a una **zona de viga de transferencia** que se extiende 30 [cm] con las mismas dimensiones de la zona de muro.

En total la probeta tiene 215 [cm] de alto con una forma de T invertida, observada en la Figura 3.1. La parte de estudio que es relevante es la zona de muro (zona en morado de la misma figura), que tiene una doble malla de $3\phi 6$ espaciados cada 20 [cm] entre ellos, con un espacio de 7 [cm] a las barras $\phi 12$ como armadura longitudinal de borde, lo cual representa una cuantía longitudinal de 0,01. Para la armadura transversal se ocupa un doble gancho en J espaciado cada 20 [cm] también con $\phi 6$, lo cual entrega una cuantía de 0,003.

Tabla 3.1 Diámetro de barras de acero usadas en el muro.

Barras longitudinales de borde	Barras longitudinales de repartición	Barras horizontales
4 $\phi 12$	6 $\phi 6$	2 $\phi 6@200$ mm

Tabla 3.2 Cuantías.

Vertical	Horizontal
0,01	0,003

La idea de que la probeta este diseñada sin confinamiento de borde es de obtener un diseño con la normativa antigua, previo al terremoto del 2010 donde se realizaron cambios en la norma de diseño con hormigón armado y se hizo énfasis en el detallamiento de borde en muros estructurales. Con el fin de observar el funcionamiento de las fibras metálicas como un reemplazo o refuerzo al confinamiento deseado producto del detallamiento de borde especial.

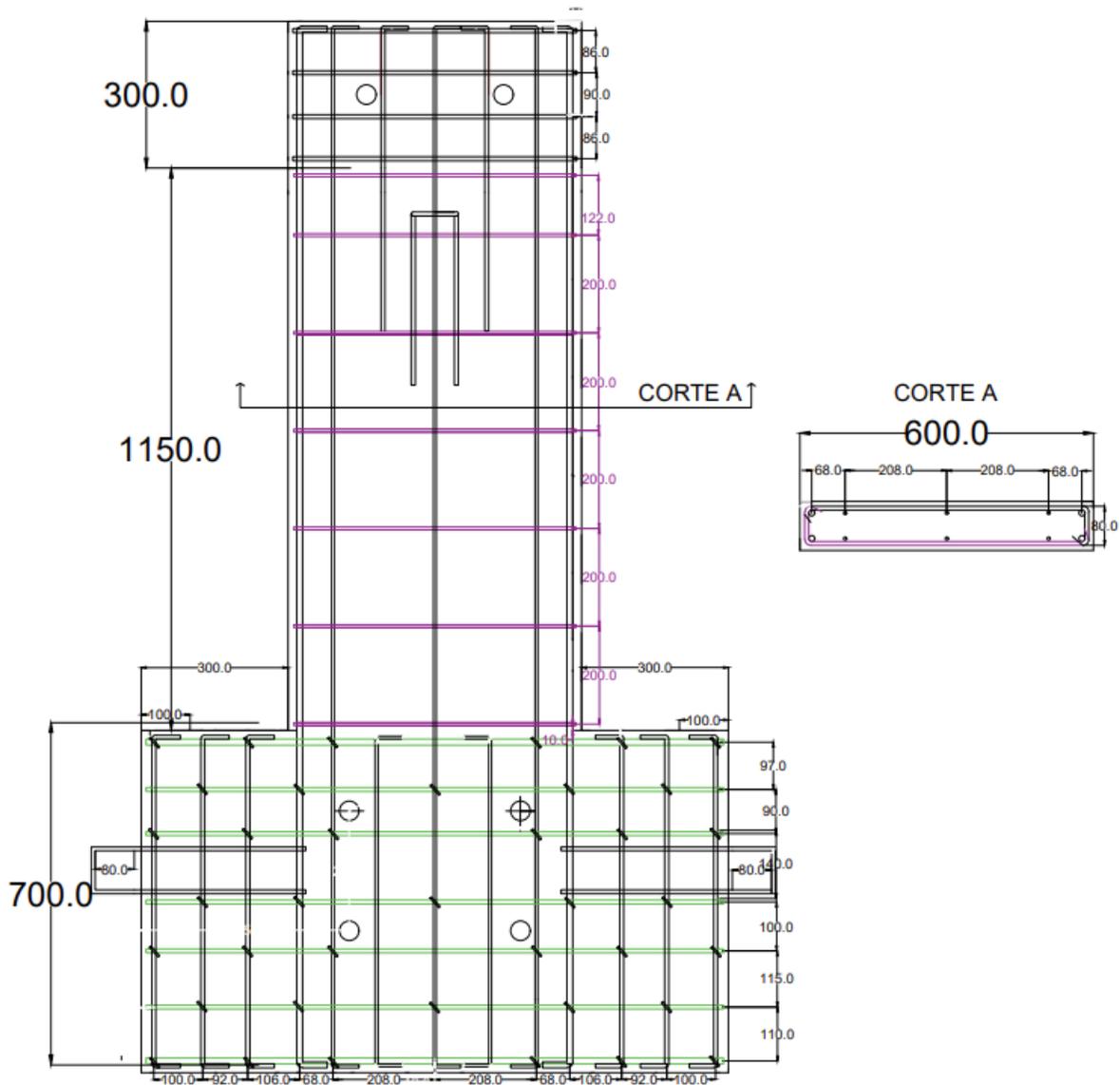


Figura 3.1 Disposición de la armadura.

Tabla 3.3 Dimensiones de las zonas del muro.

Largo [mm]	600
Alto [mm]	1150
Espesor [mm]	100

La zona de fundación (zona verde de la Figura 3.1) se encuentra sobredimensionada con doble malla de barras de 8mm de diámetro como armadura de repartición y barras de 12 [mm] de diámetro en los bordes superior e inferior. Su armadura transversal también presenta dos ganchos con forma de J los cuales van por sobre de la armadura longitudinal. Para la viga de transferencia (zona superior en negro de la Figura 3.1) también se sobredimensiona la armadura con doble malla de barras de 8 [mm] de diámetro. El fin de sobredimensionar estos elementos

que complementan la probeta de muro es aumentar su rigidez y que no sea este el motivo de falla del ensayo, si no que sea la zona de muro la cual se ve sometida a las cargas.

Esta probeta está diseñada para ser utilizada con dos fundaciones en sus costados, las cuales fueron diseñadas para empotrar este ensayo mediante una serie de postensados de barras que unen las fundaciones a la losa de reacción y el muro a las mismas fundaciones. El diseño de las fundaciones está pensado para que trabaje mediante fricción con el muro y en última instancia a corte con las barras del postensado.

3.2. Caracterización de materiales

3.2.1. Acero

El acero utilizado para la construcción de las probetas corresponde a un A63-42H. Para la caracterización del material se consideran 3 barras de 25 [cm] de largo para los distintos diámetros, $\phi 6$, $\phi 8$ y $\phi 12$.

Para ambos muros, se utiliza la misma armadura de repartición $\phi 6$ para la armadura longitudinal y transversal, además de fierros $\phi 12$ para la armadura longitudinal en los bordes. Para la fundación se utilizan $\phi 8$ como armadura transversal y longitudinal de repartición; y $\phi 12$ para los bordes transversales.

A continuación, en la Tabla 3.4 se muestran las resistencias a fluencia obtenidas a partir del ensayo a tracción de las barras de acero y en las Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4 sus gráficos Tensión-Deformación.

Tabla 3.4 Fy de las barras utilizadas en el ensayo.

	fy phi 6 [MPa]	fy phi 8 [MPa]	fy phi 12 [MPa]
Muestra 1	865,0	786,4	788,9
Muestra 2	847,7	828,4	815,6
Muestra 3	827,6	799,7	777,8
Promedio	846,8	804,8	794,1

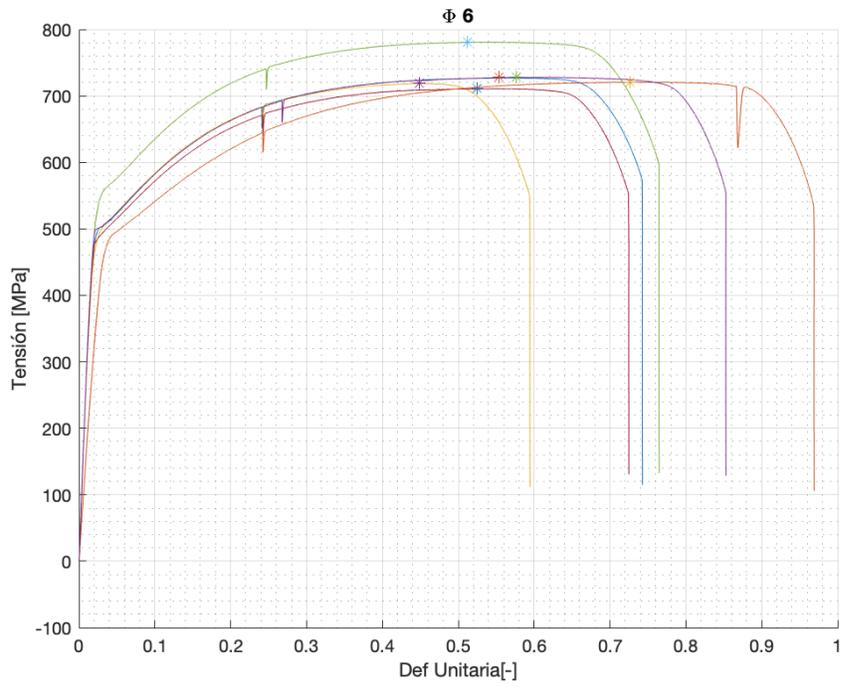


Figura 3.2 Gráfico Tensión-Deformación barras 6 [mm].

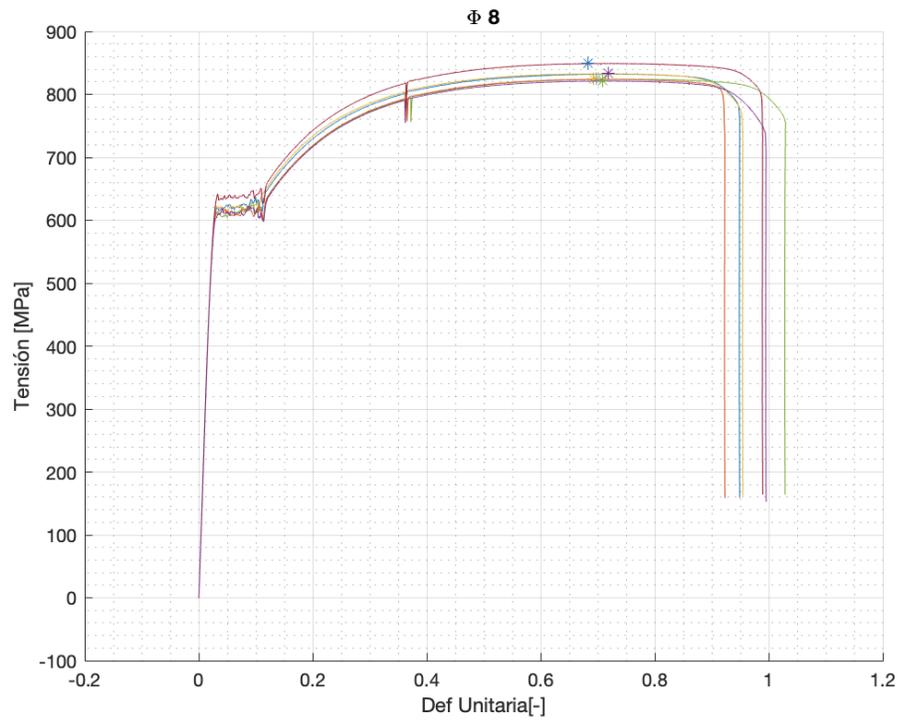


Figura 3.3 Gráfico Tensión-Deformación barras 8 [mm].

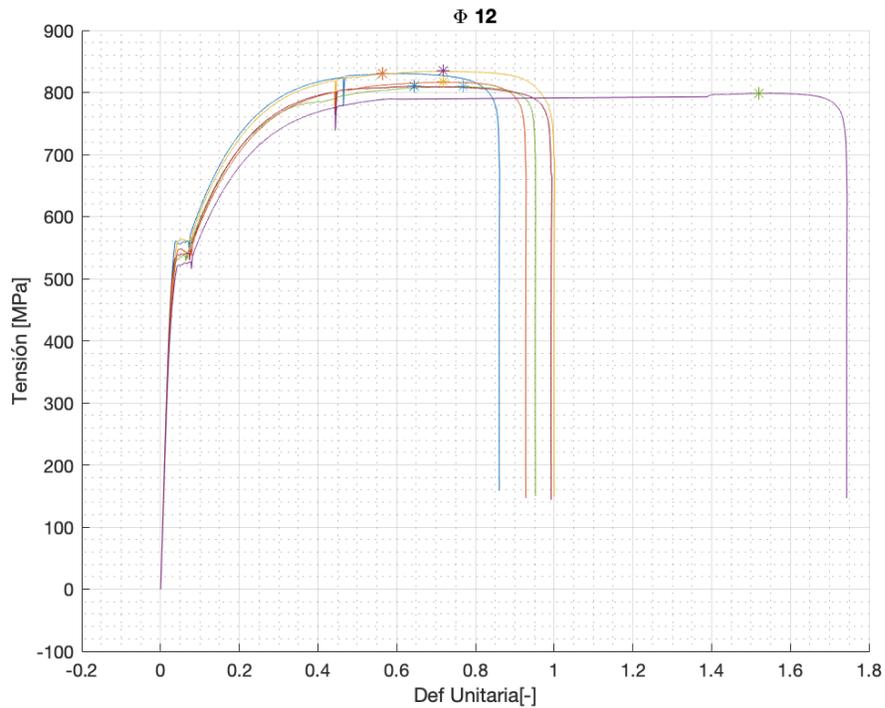


Figura 3.4 Gráfico Tensión-Deformación barras 12 [mm].

3.2.2. Hormigón

El material elegido para la elaboración de las probetas de este proyecto es un hormigón premezclado H30, con una resistencia nominal de 25 [Mpa], proporcionado por la empresa Bemezcla, mostrado en la Figura 3.5. Se optó por utilizar este tipo de hormigón debido a la rapidez con la que se puede obtener y a que su granulometría se asemeja a la de los ensayos realizados por Concha (2023), los que arrojaron buenos resultados en términos de aumento de la ductilidad.



Figura 3.5 Hormigón premezclado BEMEZCLA.

Para determinar la resistencia real del hormigón utilizado, se elaboraron un total de seis probetas cilíndricas para el primer muro, obtenidas a partir de dos tandas de mezcla, y nueve probetas cilíndricas para el segundo muro, obtenidas a partir de tres tandas adicionales. Las dimensiones de las probetas son de 105 [mm] de diámetro y 210 [mm] de altura, tal como se especifica en la norma NCh 1017-2009. La extracción de las muestras se realizó siguiendo las especificaciones detalladas en la norma NCh 171-2008. Los cilindros se ensayan luego de 28 días de haber vaciado el hormigón, así asegurándose de que estos ya se encuentran con su resistencia máxima.

Los cilindros de hormigón son sometidos a ensayos utilizando una máquina universal y se aplica una tasa de deformación de 0,5 [mm/min]. El procedimiento de ensayo es detenido una vez que la probeta ha alcanzado una degradación del 80% de su resistencia máxima, lo que permite obtener información precisa sobre el comportamiento del material ante cargas de alta intensidad. Para garantizar mediciones precisas de los desplazamientos, se utilizan dos sensores LVDT que miden la deformación real de las probetas. Además, se consideran los datos proporcionados por la máquina universal, aunque es importante tener en cuenta que estos últimos incluyen las deformaciones de todos los materiales del sistema.

En la Tabla 3.5 se observan los resultados obtenidos a partir de las probetas cilíndricas para el Muro Control, mientras que la Tabla 3.6 muestra los obtenidos para el Muro Alternativo.

Tabla 3.5 Resistencia $f'c$ cilindros de hormigón Muro Control.

Cilindro	Resistencia $f'c$ [Mpa]	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo
1	18,21	25 de enero	4 de abril
2	21,26	25 de enero	4 de abril
3	21,67	25 de enero	4 de abril
4	22,17	25 de enero	22 de agosto
5	17,14	25 de enero	22 de agosto
6	16,96	25 de enero	22 de agosto
Promedio	19,56		

Tabla 3.6 Resistencia $f'c$ cilindros de hormigón Muro Alternativo.

Cilindro	Resistencia $f'c$ [Mpa]	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo
1	23,75	6 de abril	22 de agosto
2	20,85	6 de abril	22 de agosto
3	26,10	6 de abril	28 de agosto
4	25,56	6 de abril	28 de agosto
5	18,40	6 de abril	28 de agosto
6	24,23	6 de abril	28 de agosto
7	22,63	6 de abril	28 de agosto
8	25,49	6 de abril	28 de agosto
9	19,11	6 de abril	28 de agosto
Promedio	22,90		

3.3. Componentes de la mezcla utilizada

El hormigón utilizado en este caso es un hormigón premezclado H-30 marca Bemezlca. En la Tabla 3.7 se pueden observar los materiales usados para la mezcla de hormigón para ambos muros con y sin fibra.

Tabla 3.7 Componentes que forman las mezclas de hormigón.

Material	Especificación
Hormigón premezclado	Bemezlca
Fibras de acero (3D – 65/35)	Dramix
Agua	Potable de llave

3.3.1. Granulometría del hormigón

Para un correcto estudio del árido se debe seguir lo indicado en la norma ASTM-C 136, la cual menciona que por medio de tamices estandarizados por la norma ASTM E11, tal como el mostrado en la Figura 3.6, se debe realizar un análisis granulométrico del agregado fino y grueso.



Figura 3.6 Tamiz de latón.

Para llevar a cabo un correcto muestreo, primero se debe mezclar todo el material que se tenga con la finalidad de que la muestra a estudiar sea lo más representativa posible. Luego, se extraen 500 [g] de la muestra total y se pasa por tamices estandarizados de distinta envergadura, compuestos por un marco sólido y una malla montada sobre este para áridos más grandes, y paño de cedazo para separar los finos de la muestra. Las dimensiones de cada una de las aperturas están indicadas en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Dimensión de la apertura del tamiz.

Tamiz N°	Apertura [mm]
2 1/2"	63,0
2"	50,0
1 1/2"	37,5
1"	25,0
3/4"	19,0

1/2"	12,5
3/8"	9,5
#4	4,75
#8	2,36
#10	2,00
#30	0,600
#40	0,425
#50	0,300
#100	0,150
#200	0,075

Finalmente, del tamizado de cada una de las muestras extraídas del material a utilizar durante el proyecto, se obtiene el análisis granulométrico indicado en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resultado análisis granulométrico del árido.

Tamiz nº	Apertura [mm]	Peso [g]	% Retenido	% Que pasa
2 1/2"	63,0	-	-	100%
2"	50,0	-	-	100%
1 1/2"	37,5	-	-	100%
1"	25,0	-	-	100%
3/4"	19,0	-	-	100%
1/2"	12,5	-	-	100%
3/8"	9,5	2,38	0,47%	99,52%
#4	4,75	98,69	19,73%	79,8%
#8	2,36	111,81	22,36%	57,44%
#10	2,00	21,45	4,29%	53,15%
#30	0,600	67	13,4%	39,75%
#40	0,425	14,76	2,95%	36,8%
#50	0,300	16,48	3,29%	33,51%
Tamiz nº	Apertura [mm]	Peso [g]	% Retenido	% Que pasa
#100	0,150	38,37	7,67%	25,84%
#200	0,075	27,13	5,42%	20,42%
Lavado	-	100,36	20,07%	0%
TOTAL	-	498,43	100%	-

3.3.2. Fibra de Acero

Tal como se mencionó anteriormente, las fibras de acero a utilizar corresponden a las Dramix – 3D de la empresa Bekaert observadas en la Figura 3.7, de largo de 35 [mm], 0,55 [mm] de diámetro y una proporción l/d de 65. La cuantía con la cual se trabaja en esta memoria es de 0,8% de fibras de acero. Sus propiedades mecánicas se detallan en la siguiente Tabla 3.10.



Figura 3.7 Fibras de acero Dramix 3D 65/35.

Tabla 3.10 Características de la fibra de acero.

Largo [mm]	Diámetro [mm]	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de Young [Mpa]	Densidad [kg/m ³]	Deformación máxima a tracción
35	0,66	1.345	200.000	7.850	0.8%

3.4. Construcción de las probetas

Una vez finalizado el diseño de los muros, se comienza la fase constructiva de estos, teniendo tres etapas críticas como lo son la enfierradura, luego la construcción del moldaje y por último el hormigonado de la probeta. Durante estas etapas se hace un seguimiento de los distintos pasos, al igual que van surgiendo diversos problemas durante su ejecución y que se fueron resolviendo a medida que se presentaban. A continuación, se describen estas etapas, sus dificultades y como fueron resueltas.

3.4.1. Etapa 1: Construcción de Enfierradura

La primera etapa corresponde a la construcción de la enfierradura. Este proceso fue realizado en el laboratorio Arturo Arias, en donde el alumno se encargó de todos los pasos constructivos tales como la medición, corte y doblado de las barras de fierro comprados.

El proceso comienza con la llegada de los materiales al laboratorio, donde las barras llegan en lotes de seis metros de largo, para luego ser medidas y cortadas según los planos de diseño. Una vez cortadas las barras de acero, comienza el doblado, el cual se hace con una dobladora manual de fierro mostrada en la Figura 3.8, la cual trae distintos dados para los distintos diámetros del acero.

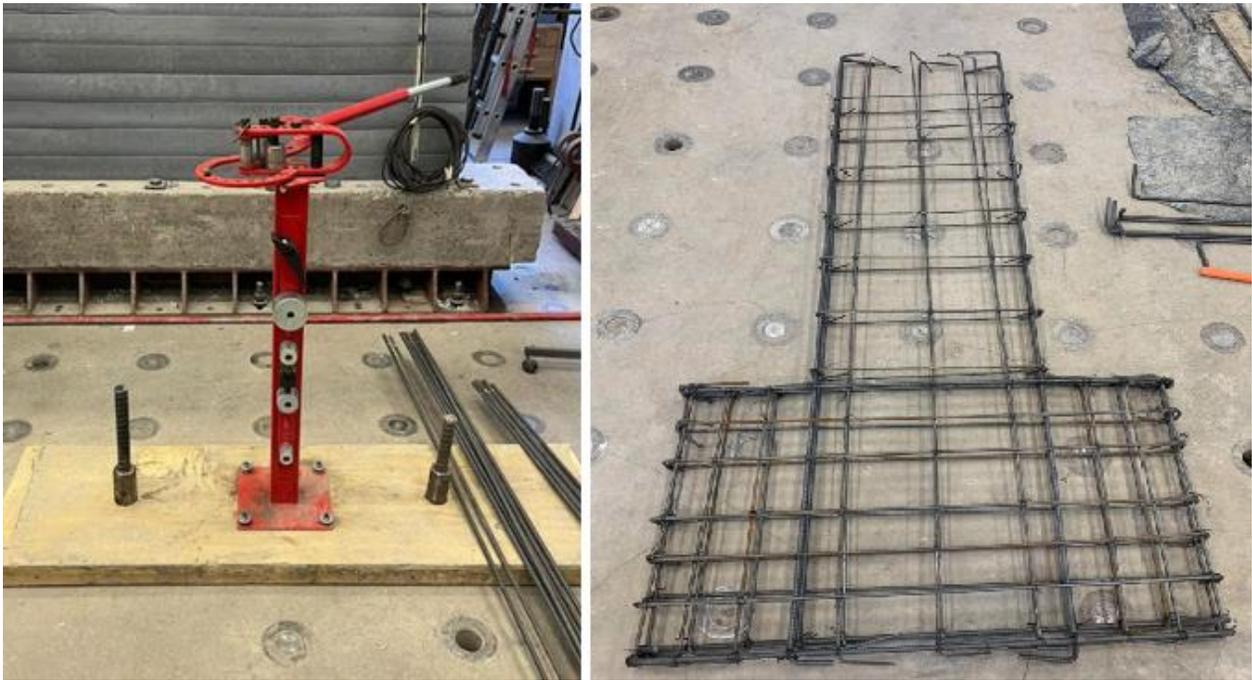


Figura 3.8 Dobladora de Fierros y Construcción de la Armadura.

Una vez que ya se encuentran cortadas y dobladas las distintas piezas de la armadura según los requerimientos de los planos de cálculo, se ensambla y amarra con alambre recocido número 18 las barras de acero previamente dobladas también mostrado en la Figura 3.8. Comenzando con la fundación del muro para luego seguir con el alma y por último armar la viga de transferencia de carga.

Para el segundo muro, ya se tienen las piezas cortadas y dobladas, pero se contrata a un maestro enfierrador (M1) para que ensamble la enfierradura.

3.4.2. Etapa 2: Construcción de Moldaje

Para esta segunda etapa, el proceso de construcción se llevó a cabo por los alumnos, midiendo, cortando y armando el moldaje observado en la Figura 3.9. Esta etapa se llevó a cabo en paralelo al ensamble de la armadura. El moldaje se armó de manera que el hormigonado sea horizontal, imitando una piscina de hormigón, esto ya que el muro es de poco espesor.



Figura 3.9 Moldaje y Enfierradura.

Con el fin de obtener el recubrimiento definido en el diseño, se amarran pedazos cortos de barras $\phi 8$ en contacto con la armadura, de esa manera se crea el espacio suficiente para que el hormigón y sus áridos se filtre entre la armadura.

La parte final del moldaje consta de ubicar tubos de PVC de diámetro 50 [mm] para crear espacio suficiente para las barras de postensado horizontal que deben atravesar el muro en sus zonas de fundación y viga de transferencia. Ubicar estos agujeros en el moldaje es una maniobra que requiere mucha exactitud ya que son agujeros que, a pesar de haber sido diseñados para obtener precisión, luego deben ser corregidos por las mediciones reales que se obtuvieron al hormigonar las fundaciones del muro.

Una vez construido el moldaje con sus perforaciones y con la armadura ya en su interior, se procede a ubicar de manera horizontal y nivelado en un lugar del laboratorio para luego ser hormigonado.

3.4.3. Etapa 3: Hormigonado

La última etapa constructiva de las probetas corresponde al hormigonado, para este proceso se utilizó la betonera ubicada en el IDIEM, desde la cual se transportó el hormigón hasta el moldaje en carretilla. Para esta operación se prepara el laboratorio cubriendo con nylon el suelo y ventanas, además de ordenar los alrededores. Esto con el fin de evitar caídas del mismo nivel y ensuciar maquinaria, los agujeros de la losa de reacción, además de las bodegas que se encuentran debajo de esta.

Al hormigonar, como se utiliza hormigón premezclado se usa la dosificación que aparece en el mismo saco, esta es de 2,5 a 3 litros de agua por saco. Se hace uso de 3 litros por saco en el caso de las probetas de muro construidas, siendo 18 sacos los necesarios para un muro.

Para la primera probeta se hizo dos tandas de mezcla, en la primera tanda se usan 10 sacos y en la segunda ocho. Ya que a pesar de la betonera ser de 200 litros de capacidad y el muro necesitar 170 litros, el IDIEM tiene un límite de 140 litros por motivos del ángulo necesario para que la

betonera funcione correctamente. Para esto, la primera mezcla de hormigón fue asistida por personal del IDIEM como se muestra en la Figura 3.10 enseñándonos a usar la betonera para luego poder hacer la mezcla del segundo muro por cuenta propia.



Figura 3.10 Betonera prestada por el IDIEM.

Primero se comienza vertiendo el 40% del agua de la mezcla para que al vaciar el hormigón este no se pegue en las paredes de la betonera, luego se termina de verter los sacos de hormigón premezclado para luego verter el 60% de agua restante y que se termine de homogeneizar hasta quedar lista la mezcla. En la Figura 3.11 se muestra como los alumnos preparan la mezcla, hasta que se encuentra lista para luego ser vertida y llevada hasta el lugar donde se encuentra ubicado el moldaje.



Figura 3.11 Uso de la betonera para hormigonado.

Para la segunda probeta, se hizo con tres tandas de mezcla de 6 sacos por tanda, para tener un mejor muestreo del hormigonado ya que esta probeta es con fibras de acero.

En esta probeta primero se disuelve el pegamento de las fibras mostrado en la Figura 3.12 para que no exista apelmotonamiento y se logre mayor homogeneidad en la mezcla. Luego se continúa de manera normal poniendo el primer 40% de agua por tanda, el total de sacos de hormigón de la tanda y esparciendo progresivamente las fibras de acero para terminar vertiendo el resto de agua en la betonera.



Figura 3.12 Fibras de acero previo al enjuague.

Una vez que se tiene la mezcla hecha y se vierte en la carretilla para acercarse al moldaje del muro y comenzar vertiendo el hormigón dentro de este, para el vibrado se utiliza un vibrador de hormigón eléctrico en vez de hacerlo mediante golpes como se hizo con el primer muro, Figura 3.13 . Además, para cada tanda de hormigón, con la poruña se sacan paladas de mezcla para llenar los cilindros que sirven como testigo para ver la calidad del hormigón que resulta la muestra. Para los muros construidos se hicieron tres probetas cilíndricas por tanda de hormigonado, por lo que para el primer muro se obtienen seis probetas cilíndricas y nueve probetas para el muro con fibras de acero.



Figura 3.13 Vertido y vibrado del hormigón.

Por último, se desmolda la probeta por los bordes y se levanta con el puente grúa para despegarlo de la placa de moldaje sobre el cual se encuentra apoyado. Hecho esto, si el muro se encuentra en buenas condiciones, sin nidos, se comienza el montaje del ensayo experimental el cual será descrito en un capítulo posterior.

Si se encuentran nidos, como paso con el primer muro, se comienza la reparación de estos. Para el Muro sin fibras solo se observó falta de hormigón en las zonas de fundación como se observa en la Figura 3.14, producto del mal vibrado y el poco espacio que deja el sobredimensionamiento de la armadura en la zona de fundación de la probeta.



Figura 3.14 Nidos observados en el Muro sin fibras luego de quitado el moldaje.

Capítulo 4

Metodología Experimental

En este capítulo se detallan cada uno de los componentes utilizados, junto a sus respectivas dosificaciones, para preparar las mezclas de hormigón seleccionadas para este proyecto. Se especifica también el método experimental llevado a cabo para la confección de probetas de muro con y sin fibras de acero.

4.1. Laboratorio de Estructuras

Los ensayos de muro se llevan a cabo en el laboratorio 'Arturo Arias' del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, observado en la Figura 4.1. El laboratorio tiene un muro y una losa de reacción, mostrados en la Figura 4.2 y Figura 4.3 con orificios a 40 [cm] de distancia que permiten la fijación de equipos y muestras de prueba. El muro tiene 2,15 [m] de alto, 1,2 [m] de ancho y en conjunto con las fundaciones tiene 0,9 [m] de espesor en la parte inferior, mientras que la losa cubre un área de 18,45 x 9,7 [m²] y tiene un espesor de 60 [cm]. Ambas estructuras están diseñadas para soportar cargas de hasta 100 [tonf]. Para mover cargas, hay un puente grúa Kixio, observado en la Figura 4.2 con una capacidad de elevación de 10 toneladas y un marco de acero con un teclé manual con cadenas que puede levantar hasta 5 toneladas.

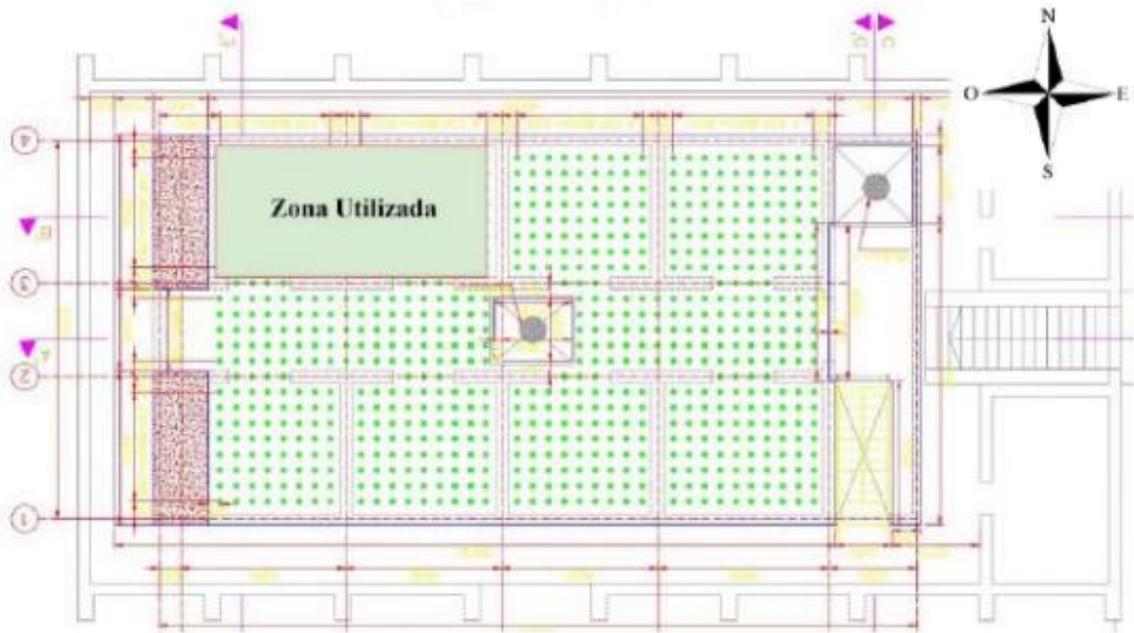


Figura 4.1 Plano en planta Laboratorio Arturo Arias.



Figura 4.2 Muro de Reacción y Puente Grúa.



Figura 4.3 Losa de Reacción.

4.2. Montaje Experimental

En esta sección se detallarán los elementos que componen el montaje experimental del muro. Cabe destacar que para el ensayo de los muros se esperan 28 días luego del hormigonado para que el hormigón se encuentre con su resistencia máxima.

Es importante fijarse en que las superficies de las estructuras de hormigón estén lisas para que no existan problemas con la transferencia de carga del actuador al muro. También que no exista interferencia u obstrucción en las perforaciones de este.

En la Figura 4.4 se observa el montaje experimental de los muros ya terminado, con el actuador horizontal ya ubicado en su posición, la carga axial ya puesta y sujeta por el teclé en caso de emergencia y el marco de acero ya ubicado con sus cuñas puestas.



Figura 4.4 Montaje Experimental.

4.2.1. Actuador Horizontal

Se entiende al actuador horizontal mostrado en la Figura 4.5 como el dispositivo que se encarga de aplicar las cargas cíclicas en ambas direcciones al muro y controlar los desplazamientos aplicados. Esto lo hace mediante la extensión y contracción de una rotula la cual va adherida al muro mediante barras y tuercas. Este sistema permite imponer desplazamientos de techo al muro a través de la viga de transferencia.



Figura 4.5 Actuador Horizontal.

El rango de desplazamientos permitido por el actuador horizontal es de 47 [cm], donde en su posición más extendida el pistón hidráulico alcanza una distancia de 60 [cm] y en su posición más comprimida alcanza los 13 [cm]. Debido al movimiento limitado que tiene el actuador, este se debe situar de manera tal que permita realizar los ciclos más altos sin impedir que este estorbe

para la realización del ensayo. Al momento de montar el actuador al muro, se dejó como largo disponible crítico 18 [cm] en una dirección.

La conexión del actuador al muro de reacción se logra ocupando la rótula mostrada en la Figura 4.6 (b) que se afirman con barras Dywidag® de 32 [mm] de diámetro con sus respectivas tuercas, mientras que la conexión actuador y probeta de muro se logra con la rótula de la Figura 4.6 (a) la cual se afirma con barras Dywidag® de 20 [mm]. El tamaño de las barras de conexión al muro viene dado por las cargas a las que estará sometido el ensayo, dado que cuando se comprime el actuador, son estas barras las encargadas de imponer el desplazamiento al muro.

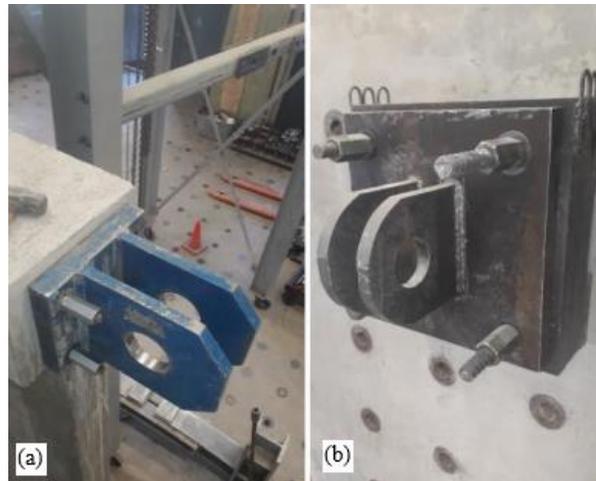


Figura 4.6 Rotulas de conexión (a) Muro - Actuador, (b) Muro de Reacción – Actuador.

El actuador logra su extensión y compresión gracias a una bomba hidráulica que permite controlar el flujo de aceite encargado de imponer movimiento al pistón. Este movimiento es controlado por una botonera que ofrece dos direcciones de desplazamiento y está unida a la bomba hidráulica. Este a su vez es controlado de manera indirecta por el desplazamiento leído en los sensores pateados por un ciclo de carga establecido para el ensayo.

La medición de la carga es registrada por una celda de carga Interface y modelo 1200HC.1244 de capacidad de 1200 [kN], la cual forma parte del actuador y se ubica entre el émbolo que controla el desplazamiento y la rótula que da hacia al muro de ensayo. El actuador tiene una capacidad máxima de 100 [tonf] y se sugiere trabajar con valores menores para no exponerse a problemas durante el ensayo. Durante el ensayo, la carga no supera las 11 [tonf].

El desplazamiento impuesto por el actuador cumple con lo impuesto por la ACI374.1 de manera para estandarizar los ensayos y hacerlos comparables con experimentos realizados tanto a nivel nacional como internacional. El procedimiento implica aplicar desplazamientos cíclicos pseudo estáticos que contienen al menos dos desplazamientos de techo dentro del rango lineal del sistema en cuestión, seguidos por un aumento gradual hasta que se produzca la falla global del muro. Estos desplazamientos se calculan a partir de una altura de 1,37 [m], medida desde el sensor LVDT crítico hasta el punto medio de la viga de transferencia. Con esta información, se puede establecer un ciclo de carga el cual debe ser ajustado en función de las condiciones del laboratorio y las características reales de los muros. Este ciclo de carga implica un aumento

gradual de la deriva, aplicando tres veces un ciclo de desplazamiento por cada porcentaje de deriva.

4.2.2. Gatos Hidráulicos

Se utilizan cuatro gatos hidráulicos como los mostrados en la Figura 4.7 para realizar las maniobras de postensado de barras. Para medir la carga se utiliza una celda de carga la cual se ubica entre el gato hidráulico y una placa de acero, ambas mostradas en la figura señalada anteriormente. La función de esta celda es ir señalando la carga aplicada para tensar la barra.

4.2.3. Postensado de Barras

Para el postensado de las barras mostrado en la Figura 4.7 se utilizan barras Dywidag® de 32 [mm] las cuales sirven para juntar tres secciones del armado de este ensayo. El armado del postensado comprende de una silla de postensado, la cual está hecha de acero, un gato hidráulico, la celda de carga, una placa de acero y dos tuercas. En este ensayo, se utiliza el postensado de barras en tres zonas distintas.



Figura 4.7 Postensado de barras verticales, Fundación - Losa de Reacción.

La primera es el postensado del muro con sus fundaciones, el cual consiste en cuatro barras que cruzan fundación-muro-fundación y deben tener el apriete suficiente para que el muro trabaje por roce con las fundaciones y no al corte de las barras en caso de que el muro rote, para esto se carga con 20 [tonf] en cada barra.

El segundo postensado mostrado en la Figura 4.7 es el que ancla todo el macizo a la losa de reacción y también consiste en cuatro barras en los costados de las fundaciones de manera vertical. Estas barras se encuentran postensadas a 15 [tonf] por barra. Este postensado es utilizado para restringir el levantamiento y deslizamiento del macizo completo.

Por último, el tercer postensado mostrado en la Figura 4.8 es el que se encuentra en la parte superior de este ensayo. Consiste en dos barras postensadas a 10 [tonf] de manera horizontal, que une las vigas de transferencia con el muro a ensayar. Este postensado es principalmente para que el actuador pueda distribuir bien la carga lateral en el muro.



Figura 4.8 Postensado de barras horizontales, Viga de transferencia – Muro.

4.2.4. Sistema de Carga Axial

El sistema de carga axial observado en la Figura 4.9 consiste en un perfil metálico doble C con atiesadores en sus costados que, en conjunto con los gatos hidráulicos, ofrecen una carga axial similar a la de los edificios. Para armar este sistema, se usan dos barras Dywidag® de 32 [mm] de diámetro (Sistema GEWI®) de 40 [ton] de carga de elasticidad, las cuales en su parte inferior se anclan a las fundaciones y en su parte superior a dos de los gatos hidráulicos. Los gatos hidráulicos al extenderse transfieren una reacción de compresión a la viga de transferencia mediante una placa de acero.



Figura 4.9 Carga axial.

Durante el ensayo, se mantiene la tensión de manera constante y uniforme en cada barra mediante el movimiento del embolo de los gatos hidráulicos, los cuales a su vez son regulados por el aceite de la bomba hidráulica.

Para que los gatos hidráulicos puedan funcionar de manera correcta, deben estar los cuatro gatos hidráulicos conectados a la bomba hidráulica, pero como la carga axial solo lleva dos de estos, para que funcione de mejor manera, se conectan los otros dos gatos hidráulicos a la losa de reacción sin estos influir directamente en el ensayo.

El valor de la carga axial sobre el muro está dado por el 10% de la resistencia máxima nominal del hormigón y el área transversal nominal ($0,1 \cdot f'c \cdot Ag$). La bomba hidráulica que controla cada gato puede aplicar valores enteros de carga, lo que significa que puede haber un delta de carga extra. La carga axial impuesta observada en la Tabla 4.1 proporciona los valores de carga axial nominal y la carga real sobre cada barra.

Tabla 4.1 Carga Axial Impuesta.

Carga Axial [tonf]		Carga por Barra [tonf]	
Nominal	Real	Nominal	Real
15	16	7,5	8

Esta tabla es importante para controlar y monitorear las cargas aplicadas durante el ensayo y garantizar que se estén aplicando las cargas deseadas en cada etapa del ensayo.

4.2.5. Marco de Acero y Arriostamiento Lateral

Manríquez y Díaz (2016) desarrollaron un sistema de sujeción lateral diseñado específicamente para muros. Este sistema se compone de un marco de acero que incorpora cuatro barras conectadas a vigas de acero que posee el marco, las cuales se tocan con el muro evitando su movimiento lateral. Este marco de acero, como se ilustra en la Figura 4.6 previamente mencionada, tiene como función principal evitar que el muro se desplace fuera de su plano durante la realización del ensayo. Las vigas metálicas integradas a la restricción lateral son ajustables en altura, que se utilizan para conectar las barras al marco de acero. La altura de estas vigas se ajusta en función de la altura del muro que se somete al ensayo.

En la parte superior del marco de acero, se dispone un tecle con una capacidad de 5 toneladas, que se emplea para maniobrar elementos dentro del laboratorio. Durante el ensayo, el tecle se utiliza para asegurar el sistema de carga axial y proporcionar seguridad en caso de que ocurra un colapso completo del muro ensayado. En la parte inferior del marco, se encuentran cuatro ruedas que permiten su movilidad dentro del laboratorio. Para evitar que se desplace durante el ensayo, los cuatro apoyos del marco se fijan a la losa de reacción mediante topes de acero.

4.2.6. Cuñas de Corte

En la base de las fundaciones por el lado Este y Oeste, se ubican las cuñas de corte observadas en la Figura 4.10, donde su función es minimizar el deslizamiento del macizo con respecto a la losa de reacción, ya que luego de obtener los resultados de desplazamiento de techo, este se debe

corregir por rotación y deslizamiento. Las cuñas de corte son esenciales para disminuir la corrección por deslizamiento.

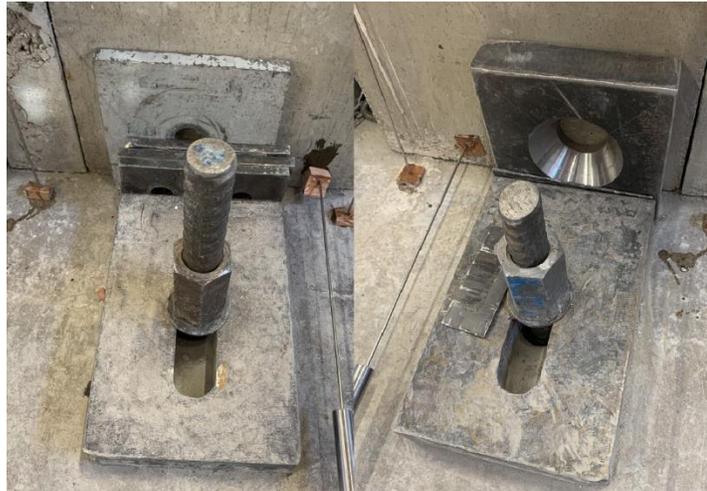


Figura 4.10 Cuñas de Corte.

4.2.7. 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. Además, se ha empleado la técnica de Fotogrametría para visualizar el agrietamiento y el modo de falla del muro. Esta técnica consiste en capturar imágenes de alta calidad y procesarlas posteriormente para determinar los desplazamientos y esfuerzos del muro.

4.2.7.1. Transformadores Diferenciales de Variación Lineal (LVDT)

Los LVDT son sensores que se usan para medir desplazamientos lineales de manera precisa. Como se ilustra en la Figura 4.11, consisten en el cuerpo cilíndrico el cual tiene un hueco por el centro, donde por ese hueco recorre el core o núcleo produciendo un voltaje de salida proporcional al desplazamiento del núcleo dentro del cilindro.

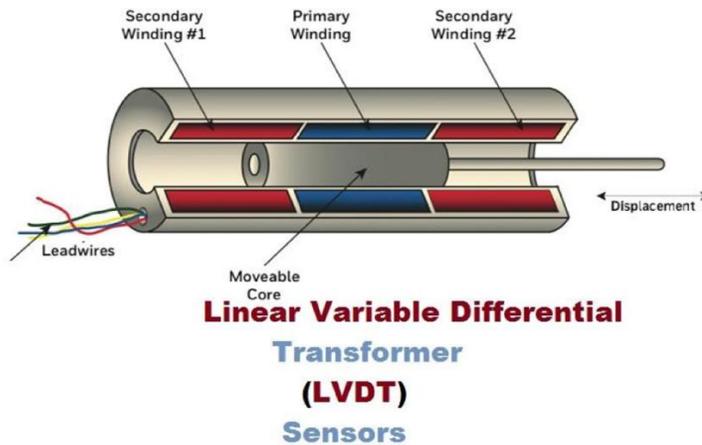


Figura 4.11 Componentes sensor LVDT.

Los LVDT bipolar Macrosensors®DC 750 tienen la capacidad de medir en un rango de -10 [V] a 10 [V], permitiendo detectar desplazamientos positivos y negativos con respecto a una posición de referencia. Estos sensores son capaces de medir desplazamientos de entre 1 y 20 pulgadas, lo que les permite detectar movimientos de diferentes magnitudes dependiendo de la aplicación específica. Debido a su alta precisión y confiabilidad, es fundamental que se calibren y utilicen en las condiciones adecuadas.

Para el ensayo se utilizaron 22 sensores LVDT, esto debido a tener muchos posibles movimientos del muro con respecto a las fundaciones. Estos se dividen en dos, los sensores CRÍTICOS y los NO CRÍTICOS. Los críticos son utilizados para obtener las correcciones por rotación, mientras que los no críticos solo se utilizan para registrar desplazamientos, su nomenclatura y ubicación será señalada a continuación y mostrada en la Figura 4.12:

1. CRÍTICOS:

- LVDT ROT IZQUIERDO (CANAL 0): Este sensor se encuentra en de manera vertical pegado a la zona de fundación del muro en la cara poniente y se utiliza para medir desplazamientos verticales/levantamientos debido a la fuerza aplicada por el actuador sobre el muro en dirección contraria. Este sensor en conjunto con el siguiente permite obtener correcciones por rotación.
- LVDT ROT DERECHO (CANAL 1): Este sensor también se encuentra de manera vertical y pegado al muro, pero por la cara Este del montaje. También es un canal crítico debido a que registra posibles levantamientos del muro y en conjunto con los canales 5 y 6, los cuales son sensores verticales pero pegados a la cara de las dos fundaciones, se pueden ver posibles rotaciones muro fundación.
- LVDT INFERIOR (CANAL 2): Este es un sensor horizontal que se encuentra situado en un soporte externo al muro y con la varilla pegada a la cara Este del muro en la zona de fundación, que registra posibles deslizamientos del muro con respecto a la losa de reacción.

- LVDT SUPERIOR (CANAL 3): Este también es un sensor horizontal, el cual se encuentra situado en el mismo soporte externo del CANAL 2 por el lado Este del muro, pero su varilla se encuentra pegada aproximadamente en el centroide de la viga de transferencia, se encarga de medir el desplazamiento lateral del muro en altura que se traduce a determinar la deriva a la cual se somete el muro en cada ciclo.
- LVDT ACTUADOR (CANAL 4): Es un sensor horizontal ubicado en el pistón del actuador, que a diferencia de los otros LVDT CRITICOS, no mide deformaciones del muro, sino que es utilizado para registrar el desplazamiento lateral del pistón y puede servir como un control secundario de desplazamiento de techo. Este sensor tiene una capacidad máxima de 20 pulgadas.

2. NO CRÍTICOS:

- CANALES 5 y 6 (VERTICALES O): Estos canales están ubicados de manera vertical en la cara Oeste del montaje, están pegados a las caras de la fundación y registran posibles levantamientos de las fundaciones.
- CANALES 7 y 8 (VERTICALES E): Al igual que los canales 5 y 6, estos también están dispuestos de manera vertical, pegados a las caras de la fundación por el lado Este del ensayo. Registran posibles desplazamientos verticales y en conjunto con los sensores verticales CRITICOS, se puede medir rotaciones del muro con respecto a sus fundaciones.
- CANALES 9 y 10 (HORIZONTALES): Estos sensores están instalados en el lado Este en la losa de reacción y con la varilla pegada en las fundaciones. Registran posible desplazamiento lateral de las fundaciones.
- CANALES 11, 12, 15 y 16: Estos sensores están instalados en el muro de manera vertical y su varilla esta pegada a la fundación, esto para registrar posibles estiramientos del muro.
- CANAL 17: Este sensor se encuentra ubicado en la parte superior del muro de manera horizontal y registra posibles deslizamientos entre la viga de transferencia y el muro. Este en conjunto con los sensores 15 y 16 registran posibles rotaciones de la viga de transferencia con respecto al muro.
- CANAL 18: Este sensor se encuentra ubicado de manera horizontal en la parte superior de la zona de fundación del muro y su varilla esta pegada al costado del muro, en donde se encuentra la rótula plástica.
- CANALES 19 y 20 (DIAGONALES): Estos sensores se encuentran dispuestos de manera diagonal en el muro, anclados a los hilos sin fin que se encuentran pegados al muro. Con estos sensores se puede registrar las tracciones en el muro.
- CANAL 21: Este sensor no es un LVDT, sino que está conectado a la celda de carga, la cual mide la carga axial durante el ensayo.

- CANAL 22: Este canal registra la carga que se utiliza durante los distintos ciclos del ensayo. La mayor carga que se alcanza es de 10 toneladas de carga lateral durante el ensayo.

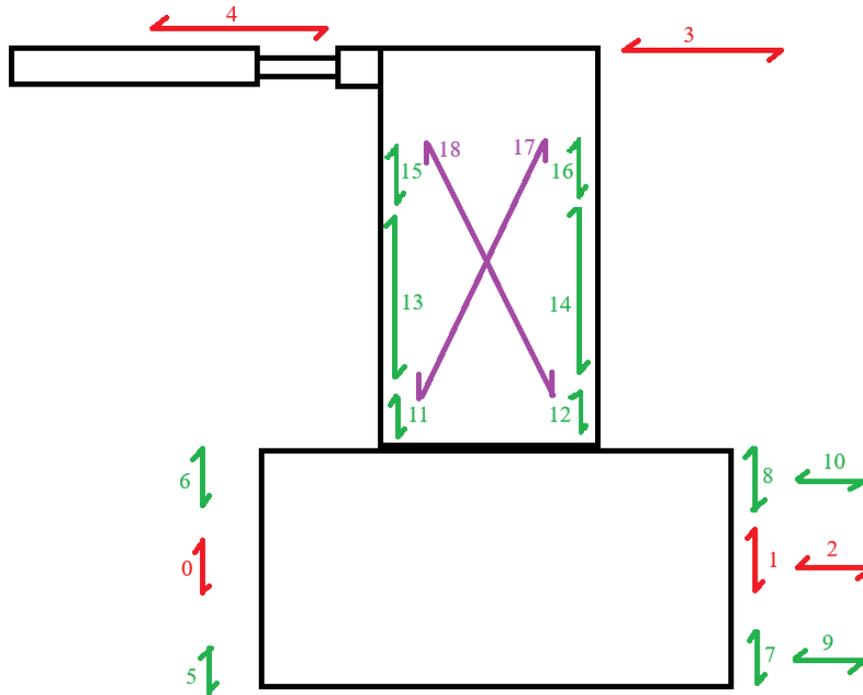


Figura 4.12 Esquema ubicación de los sensores según Muro Con Fibras de Acero.

Los sensores LVDT deben ir conectados a una caja de conexión mostrada más adelante en la Figura 4.13 en donde se debe especificar en que canal va conectado cada sensor.

Para el ensayo del segundo muro, se ocupó la misma disposición de sensores LVDT a excepción de los canales 17 y 18 del experimento anterior, ya que los datos que aportan estos sensores son solamente relevantes para evidenciar si existe deslizamiento entre la viga de transferencia en el muro, la cual el sensor registro que este deslizamiento era despreciable. El canal 18 al estar ubicado en la zona de la rótula plástica, existe descascaramiento de hormigón por ese lado y deja de registrar datos, mostrando que, hasta antes del desprendimiento no registra deslizamiento del muro con su propia fundación.

4.2.7.2. Sistema de Adquisición de Datos

En el estudio realizado por Muñoz en 2018, se diseñó una caja de conexión especializada para los sensores LVDT mostrada en la Figura 4.13. Esta caja cuenta con 32 entradas DB9 que permiten la conexión de los sensores, y una salida DB37 que concentra las señales de los sensores en un único módulo del sistema de adquisición de datos. Además, la caja incluye tres entradas para la conexión de voltaje (positivo, negativo y tierra), las cuales se conectan a una fuente de alimentación de la marca RIGOL® (modelo DP832), mostrada en la misma figura, que proporciona

una alimentación de ± 15 [V]. Es importante destacar que esta caja de conexión es utilizada para conectar los 22 LVDT mencionados previamente, simplificando así el proceso de interconexión de los sensores.

En el proceso de adquisición de datos, se empleó un conjunto de equipos mostrados en la Figura 4.13 que incluye el chasis NI cDAQ-9188XT de National Instruments® y los módulos de adquisición de datos NI9205 (para la lectura de voltaje) y NI9237 (para la lectura de la celda de carga). La caja de conexión de los sensores LVDT se conecta al módulo NI9205 utilizando una extensión DB378. Para suministrar energía a los equipos, se utilizó una fuente de alimentación específica, el modelo NIPS-15. Es importante mencionar que la celda de carga del actuador se conecta al Canal 4 del módulo NI9237, lo cual permite la medición y registro de datos relacionados con su funcionamiento. Estos equipos y su interconexión fueron fundamentales para el desarrollo de la investigación realizada en el marco de la tesis.

Las señales capturadas son transmitidas desde la caja de conexión al computador principal mediante un conector RJ45. Para el procesamiento de estas señales, se utiliza el software LabVIEW®, el cual cuenta con un VI programado de acuerdo con las condiciones particulares de este conjunto de ensayos. A través de la interfaz del software, es posible realizar la lectura en tiempo real de las 22 señales utilizadas en cada ensayo las cuales son posteriormente almacenadas en un archivo de texto. Esta configuración permite un registro preciso y confiable de los datos obtenidos durante los ensayos.



Figura 4.13 Equipos para conexión de sensores LVDT.

4.2.7.3. Fotogrametría

Para la fotogrametría, se instala un set de cinco cámaras fotográficas Canon® en distintas zonas del muro. El set de cámaras consiste en una cámara central, dos de manera frontal en los costados del muro, y otras dos por los laterales del muro. Se utiliza el programa DSLR Remote Pro Multi-camera® para tomar las fotografías a distancia y asegurar la sincronización de las cinco cámaras.

La siguiente etapa de la fotogrametría es el análisis de las imágenes tomadas, para esto se usa el software Ncorr. Para poder usar el programa de manera correcta, se debe pintar la cara a estudiar del muro con una grilla de puntos negros de manera aleatoria y con un contraste.

Se comienza pintando con pintura blanca hasta que el muro quede blanco y luego de eso se pinta la grilla de puntos de distinto tamaño en toda la superficie del muro y una franja de la fundación.

El protocolo de fotografías consiste en obtener imágenes en los puntos extremos de los ciclos de carga, en el peak de carga hacia el Este, peak de carga al Oeste y en el centro (punto cero).

4.2.8. Ensayo Experimental

En esta memoria, se desarrolla un novedoso enfoque para el diseño, construcción y ensayo de probetas de muro, permitiendo realizar ensayos experimentales de manera controlada mediante un par de fundaciones que se anclan a la losa de reacción del laboratorio y un par de vigas de transferencia, las cuales pueden ser reutilizadas en varios ensayos cambiando solo la probeta de muro.

La manera en que se prepara la probeta de muro para ser ensayada es mediante una serie de postensados que unen el muro con sus fundaciones y vigas de transferencia, las cuales están diseñadas para trabajar por fricción. En caso de que el muro deslice de las fundaciones, terminan trabajando las barras metálicas a corte, pero no es lo que se busca.

Las tareas necesarias para poder ensayar la probeta de muro son:

1. Izar el muro y ubicarlo entre las dos fundaciones y luego postensar.
2. Postensar las fundaciones a la losa de reacción.
3. Levantar las vigas de transferencia hasta su ubicación en lo alto del muro y postensar.
4. Instalar ambas rotulas, una en el muro de reacción y la otra en las vigas de transferencia.
5. Posicionar actuador en ambas rotulas.
6. Instalación del sistema de carga axial.
7. Posicionar y anclar marco de soporte y ajustar sistema de restricción lateral.
8. Asegurar el sistema de carga axial al marco de soporte
9. Pintar con pintura blanca todo el muro.
10. Generar patrón de puntos en la cara de la fotogrametría
11. Instalar sensores de instrumentación.
12. Instalar cámaras fotográficas.
13. Energizar todo el sistema de instrumentación, verificar y ajustar.

Una vez que se llevan a cabo todas las tareas enumeradas, es posible llevar a cabo el ensayo. Tanto el ensayo de Muro Convencional como el Muro con fibras de acero se llevaron a cabo bajo los mismos procedimientos de montaje.

Capítulo 5

Resultados Experimentales

En el presente capítulo se exponen los resultados experimentales obtenidos para cada muro y para el experimento en general, ya que es primera vez que se utiliza la metodología de fundaciones reutilizables mediante postensado de barras. Se examinan detalladamente los registros obtenidos a partir de los sensores LVDT, y se realizan correcciones precisas para tener en cuenta posibles imprecisiones relacionadas con el montaje, como el deslizamiento y la rotación del muro con respecto a sus fundaciones durante el proceso de ensayo. Es importante destacar que ambos muros fueron construidos bajo las mismas condiciones ambientales y con geometrías idénticas, lo que los convierte en sujetos comparables entre sí. Esta similitud en las condiciones de ensayo nos permite obtener conclusiones significativas acerca del efecto de las fibras de acero en el comportamiento estructural de los muros. Al contar con una base de comparación sólida, podemos evaluar con mayor precisión el impacto y aporte que las fibras de acero pueden ofrecer en términos de resistencia y ductilidad de los muros en estudio.

Para obtener el desplazamiento de techo real se debe tomar en consideración la componente de desplazamiento horizontal que aporta la rotación del muro con respecto a la fundación. Además, se debe descontar cuanto desliza en el sentido de aplicación de la carga. Esta relación mostrada en la ecuación 5.1 se utiliza para corregir el desplazamiento de techo por giro y deslizamiento.

$$\Delta\text{Corregido} = \Delta\text{Superior} - \Delta\text{Inferior} - (\Delta\text{Rot}_{der} - \Delta\text{Rot}_{izq}) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad 5.1$$

Debido a que la botonera de la bomba hidráulica que controla el actuador horizontal no es tan precisa para pequeños desplazamientos, se decide controlar por carga los ciclos hasta la deriva del 0,4%. Terminada esta deriva, los ciclos se controlan por desplazamiento. Para este protocolo de carga mostrado en la Tabla 5.1 se obvia la deriva de 0,075%, para que el ensayo sea más expedito y se ajustan los valores a la geometría real del muro.

Tabla 5.1 Protocolo de Carga Nominal Modificado.

Drift [%]	Desplazamiento [mm]
0,05	0,7
0,10	1,3
0,15	2,0
0,20	2,6
0,30	3,9
0,40	5,2
0,50	6,5
0,75	9,8
1,00	13,0
1,25	16,3
1,60	20,8

Drift [%]	Desplazamiento [mm]
2,00	26,0
2,50	32,5
3,20	41,6
4,00	52,0

Para el cálculo de las deformaciones de corte se utilizan los sensores ubicados en las diagonales del muro y la siguiente ecuación 5.2 propuesta por el estudio Wallace y Massone (2004).

$$\Delta U_s = \frac{\sqrt{D_1^{meas^2} - h^2} - \sqrt{D_2^{meas^2} - h^2}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{l} - \alpha \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{l} \cdot h \quad 5.2$$

Donde D_i^{meas} corresponde al largo de la diagonal i de la zona de la probeta estudiada (porción del muro), V_i corresponden a los desplazamientos verticales en los puntos superiores de la zona estudiada, l corresponde al ancho de la zona estudiada, h es el alto de la zona estudiada y α corresponde a la distancia entre la parte superior de la zona estudiada hasta el centro de la distribución de curvatura. Esto se representa en la Figura 5.1

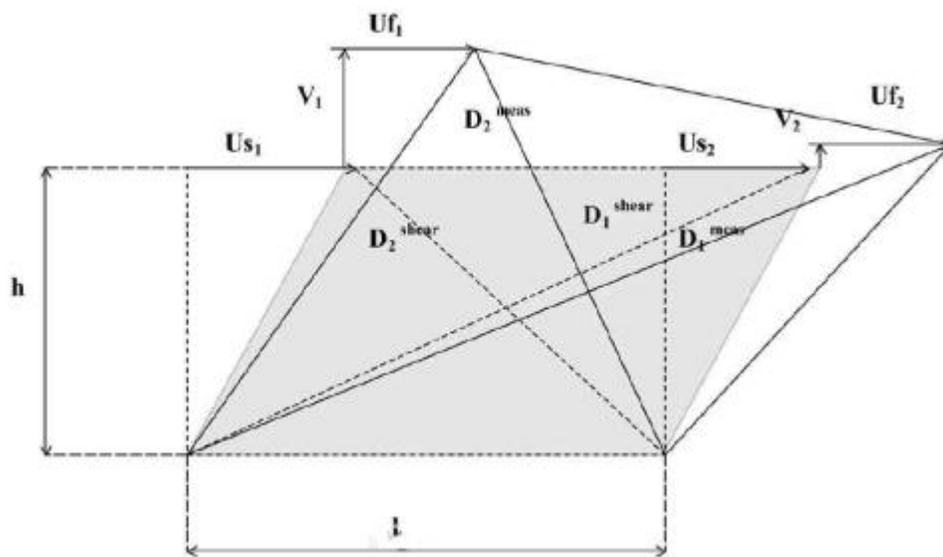


Figura 5.1 Diagrama de Desplazamientos de Modelo Flexural (Wallace y Massone, 2004).

Donde la versión simplificada de la ecuación es la siguiente:

$$\Delta U_s = \frac{D_o}{(2L)} \cdot (Diagonal 1 - Diagonal 2) \quad 5.3$$

Para el cálculo de las deformaciones a flexión se ocupan los registros obtenidos de los sensores verticales ubicados en los costados de la cara sur del muro. Para ello se integran los sensores en la altura, obteniendo el desplazamiento a flexión.

Por convención se utiliza que el lado negativo es en la dirección Este del laboratorio, opuesto a donde está ubicado el actuador hidráulico y en ambos ensayos se utiliza el mismo protocolo de carga.

Ambos ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones tanto ambientales como de montaje en el laboratorio, por lo que cualquier diferencia en la respuesta global de cada muro es netamente por la adición de fibra a la mezcla de hormigón del muro alternativo. A continuación, se presentan las respuestas globales de ambos muros, detallando sus comportamientos en el ensayo y sus modos de falla.

5.1. Respuesta global sistema de fundaciones reutilizables

En esta sección se abordarán los resultados derivados del uso de fundaciones reutilizables en lugar de un enfoque monolítico. Los hallazgos sugieren que el sistema es efectivo, ya que como se muestra en la Tabla 5.2, se observaron pocos desplazamientos entre las fundaciones y la losa de reacción. Además, se verificó que el postensado de las barras horizontales Fundación-Muro se realizó con la tensión adecuada, ya que las fundaciones funcionan por fricción y presentaron un deslizamiento mínimo con respecto al muro. Asimismo, es importante destacar que el sistema de postensados verticales Fundación-Losa de Reacción también funcionó de manera óptima, dado que los desplazamientos detectados entre estos componentes también fueron limitados.

En relación con el ensayo del muro control, se observaron menores desplazamientos entre el muro y la fundación de deslizamiento y levantamiento que el muro alternativo. Esto podría atribuirse a varias razones, como la posibilidad de que las cuñas de corte no estuvieran adecuadamente posicionadas. Además, debido a que el proceso de postensado implica múltiples rondas de apriete a medida que las estructuras se acomodan, es posible que ciertas áreas se aflojen gradualmente. Este fenómeno se evidenció en ensayos realizados por otros grupos, donde se observó que producto del acomodo de partes, el muro se soltó con respecto a la fundación y se tuvo que detener el ensayo para apretar mediante postensado nuevamente.

Tabla 5.2 Desplazamientos Sistema Muro-Fundación.

Desplazamiento máx [mm]	Ensayo sin fibras		Ensayo con fibras	
	Muro	Fundación	Muro	Fundación
Vertical	1.1	1.2	2.9	2.1
Horizontal	0.6	0.4	2.2	1.2

5.2. Respuesta global Muro sin fibras de acero

Durante el ensayo se mantiene aplicada una carga axial igual a 16 toneladas distribuidas en dos barras, lo que equivale a $0,1 \cdot f'c \cdot Ag$. Esta carga se mantiene a lo largo de todo el ensayo verificando que sea estable. La carga axial oscila debido a la dificultad de la bomba hidráulica de mantener estable la carga, pero siempre cercano al valor deseado.

En este ensayo, nadie se percató hasta el final que, por problemas de la ecuación de corrección, el desplazamiento al que llegaba el muro hacia un lado era más grande que hacia el otro, pero mostrando la misma carga hacia ambos lados. Producto de esto, los resultados se muestran todos con un menor desplazamiento hacia el lado Oeste. En Tabla 3.3 se muestran los desplazamientos reales respectivos a cada lado.

En el ensayo el muro además experimenta desplazamientos asociados a la rotación y al deslizamiento de la fundación. Estos se corrigen con la Ecuación 5.1 que se muestra anteriormente y para evitar que existan estos desplazamientos, se instalan cuñas de corte para evitar el deslizamiento de las fundaciones y placas sobre las fundaciones, las cuales se colocan al momento de postensar contra la losa de reacción.

Cada vez que se llega a los peaks en los ciclos y cada vez que se llega al momento de cero cargas, se toman fotografías para ser procesadas con fotogrametría.

La Figura 5.2 muestra la curva carga-desplazamiento obtenida con el registro de deriva de techo corregida del sensor superior en el muro y la celda de carga del actuador horizontal. En esta se observa la asimetría obtenida entre ambos lados.

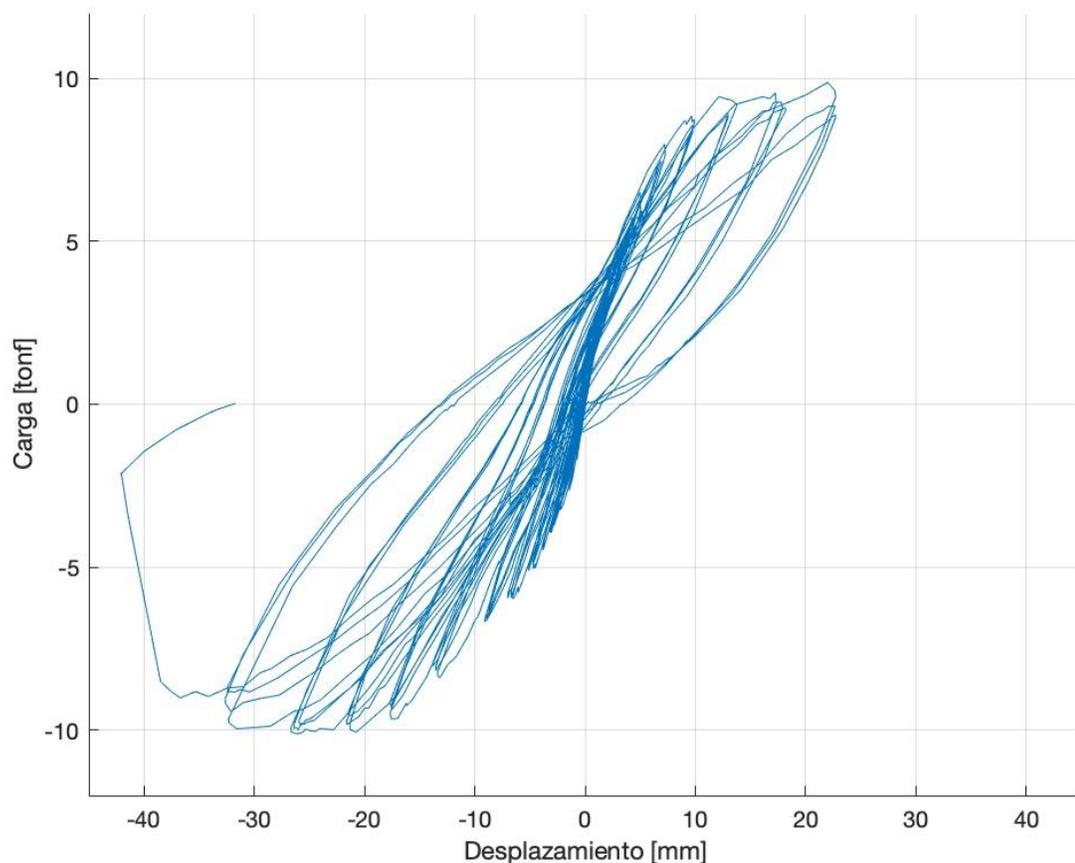


Figura 5.2 Curva carga-desplazamiento Muro sin fibras.

Tabla 5.3 Desplazamientos Reales.

Deriva [%]	Desplazamiento Oeste [mm]	Desplazamiento Este [mm]
0,05	0,9	-0,7
0,1	1,4	-1,4
0,15	1,9	-2,2
0,2	2,4	-3,1
0,3	3,6	-4,7
0,4	4,4	-6,5
0,5	5,0	-9,1
0,75	7,3	-13,4
1,0	9,9	-17,6
1,25	13,7	-21,3
1,6	17,4	-26,7
2,0	22,7	-32,3

5.2.1. Desplazamiento de Corte y Flexión

Un aspecto significativo que merece análisis es el desplazamiento producido por esfuerzos de flexión y corte en el muro.

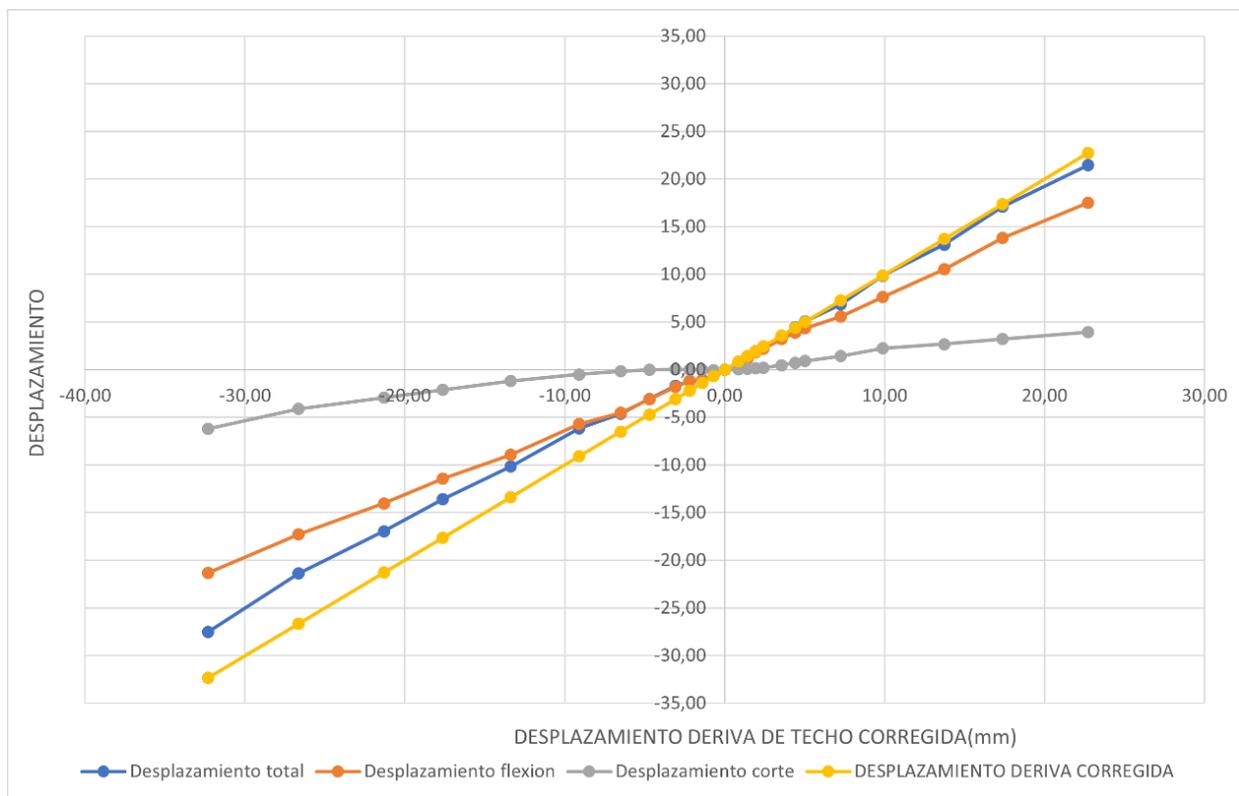


Figura 5.3 Contribuciones de Desplazamiento por Flexión y Corte Muro sin fibras.

A partir de la Figura 5.3, se puede apreciar que la principal fuente de desplazamiento es debido a la flexión, lo cual difiere de lo que generalmente se observa en muros estructurales, donde el corte suele ser el factor predominante. Esta variación se atribuye a la esbeltez presente en el diseño de los muros. Las curvas se obtienen tomando los peaks de las curvas carga desplazamiento de flexión y corte encontradas en el Anexo A y Anexo B. Luego, la curva azul es la suma de la contribución por Corte y Flexión, y la curva amarilla es el desplazamiento corregido por la ecuación 5.1 a lo largo de las distintas derivas.

5.2.2. Deformaciones unitarias en altura

En este ensayo, producto del montaje en base a postensados, existe un movimiento relativo entre la fundación reutilizable postensada y la fundación del muro. Para el cálculo de las deformaciones unitarias se debe corregir este movimiento relativo. Para esto, se utilizan los sensores ubicados en el costado del muro (11, 12, 13 y 14) observados en la Figura 4.12. Debido a que la probeta de muro no es monolítica a sus fundaciones, es decir existe movimiento entre estas, se aplica una corrección a los sensores que se encuentran pegados muro-fundación (sensores 11 y 12). Para esta corrección se comienza calculando las rotaciones que tienen el muro y su fundación por separado con respecto al centro de rotación, mediante la ecuación 5.4:

$$\theta = \frac{V1 - V2}{dl} \quad 5.4$$

Donde dl es la distancia horizontal entre los sensores verticales de la fundación en ambos lados. Una vez ya obtenido los ángulos de rotación para el muro y para la fundación, se multiplican estos ángulos por la distancia horizontal desde el punto de rotación hasta el sensor 11 o 12. El resultado de esta multiplicación es la proyección vertical de cuanto se desplaza el muro verticalmente en el sensor. Estos resultados de la proyección vertical del muro y fundación luego se suman representando la corrección que se debe aplicar como resta a los sensores de la rótula plástica (sensores 11 y 12).

Luego de haber aplicado la corrección a los sensores se determina que no corrigen de buena manera las deformaciones unitarias por lo que no se mostraran en esta memoria ya que no es un dato representativo.

5.2.3. Evolución de daño Muro sin fibras

El desarrollo de grietas se comienza a observar a partir de la deriva 0,4%. En el “peak East” del primer ciclo de esta deriva se percata de manera visual que comienza a aparecer una fisura horizontal, luego al llevar el muro hasta el peak contrario, comienzan a aparecer grietas diagonales en la zona Este y Central de muro. Del lado Oeste, al haber sido sometido a menores cargas que su contraparte, recién empieza a exhibir grietas diagonales en el tercer ciclo de la deriva del 0,5%.

En el segundo ciclo de la deriva 0,75% se aprecian un aumento en la cantidad de grietas diagonales en la zona de la rótula plástica. A partir de esta deriva, se siguen viendo las mismas grietas mientras aumentan su tamaño. En el primer peak de la deriva de 1,0% en el lado Este como se muestra en la Figura 5.4, se comienzan a observar las primeras grietas por compresión.



Figura 5.4 Deriva 1,0% lado Este, Peak Este

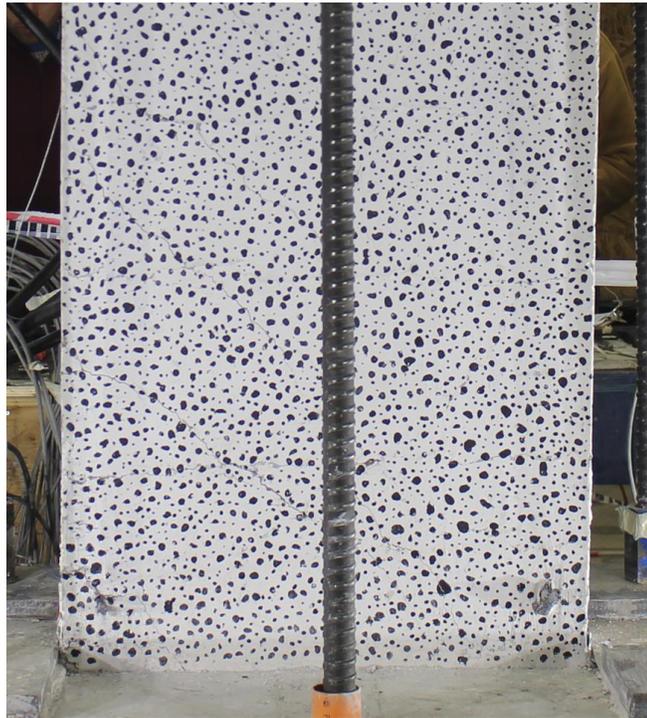


Figura 5.5 Evolución de grietas, segundo ciclo deriva 1,6% (peak Oeste).

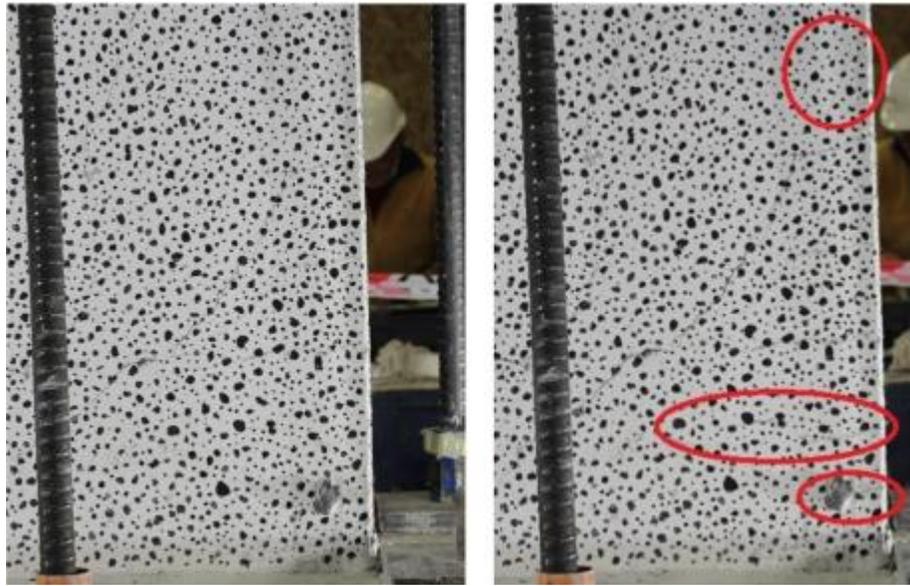


Figura 5.6 Evolución de grietas en el lado Oeste. deriva 1,25% y luego deriva 1,6% (peak Este).

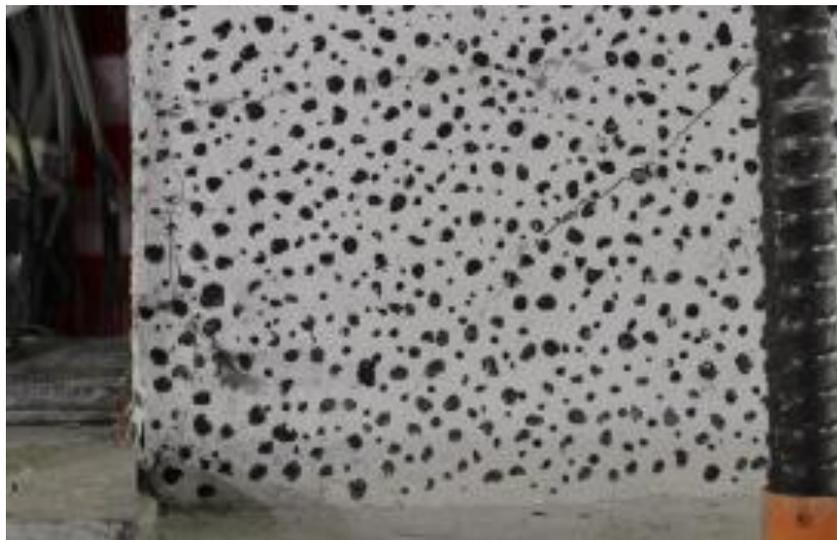


Figura 5.7 Grietas causadas por pandeo en tercer ciclo de deriva 1,6% (peak Este).

A partir de la deriva del 2,0%, en la Figura 5.8 se comienza a ver descascaramiento del hormigón de recubrimiento a nivel de coronamiento y se observa el pandeo de los elementos de borde.

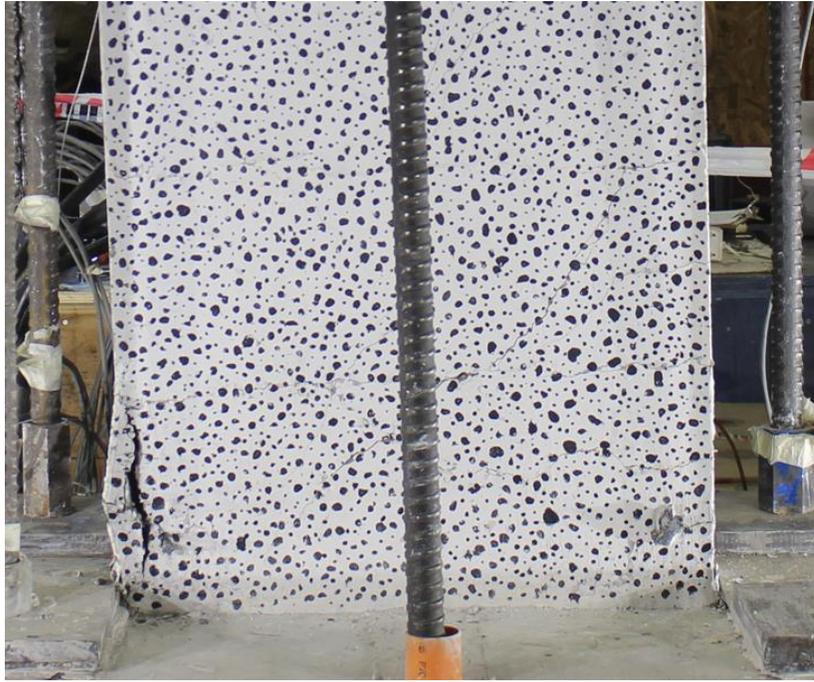


Figura 5.8 Grietas primer ciclo deriva 2,0% (peak Este).

Cuando se lleva al muro al peak del lado Este en el primer ciclo de la deriva 2,5%, como se observa en la Figura 5.9 y Figura 5.10, se abre el recubrimiento del borde del muro en la parte inferior del lado Este, observando el pandeo de las barras y caída de la carga.



Figura 5.9 Base muro NORTE al término del ensayo.



Figura 5.10 Base muro SUR al término del ensayo.



Figura 5.11 (a) Coronamiento lado Este, pandeo de barras longitudinales - (b) Coronamiento lado Oeste, agrietamiento. Deriva 2,0%.

5.3. Respuesta global Muro con fibras de acero

El segundo muro ensayado posee una geometría y diseño de enfierradura idéntico al primer muro, con la diferencia que la mezcla posee una cuantía de 0,8% de fibra de acero Dramix 3D 65/35. Con esta adición de fibra, se busca tener una mejora en el comportamiento y buscar mejorar la ductilidad en comparación al muro control. Para este ensayo se mantuvo la misma carga axial que en el ensayo anterior verificando que se mantenga dentro de los valores establecidos.

El ensayo del segundo muro se logró mejor que el primero, ubicando de mejor manera los sensores LVDT, además se corrigió el problema de la ecuación de corrección, logrando que los desplazamientos quedaran simétricos para ambos lados. En la siguiente Figura 5.12 se muestra la curva carga-desplazamiento del muro alternativo. Se observa que logra porcentajes de deriva mayores a los del primer muro, aumentando la resistencia y ductilidad.

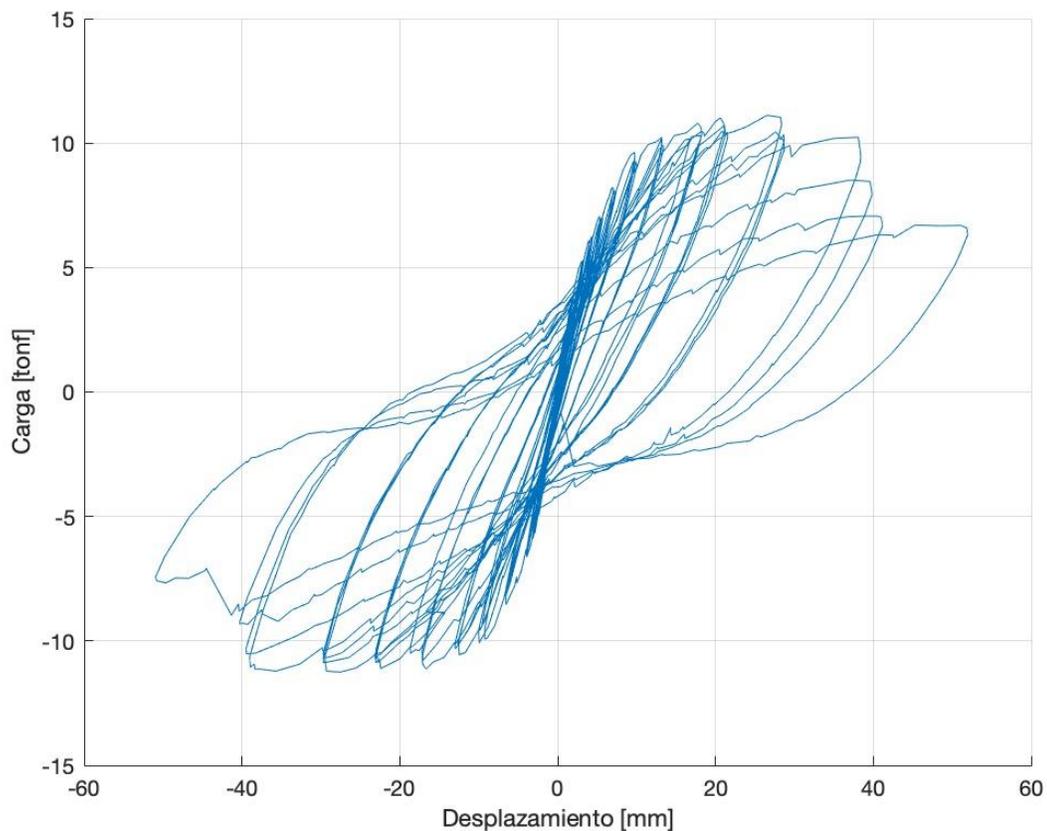


Figura 5.12 Curva carga-desplazamiento Muro con fibras de acero.

5.3.1. Desplazamiento de Corte y Flexión

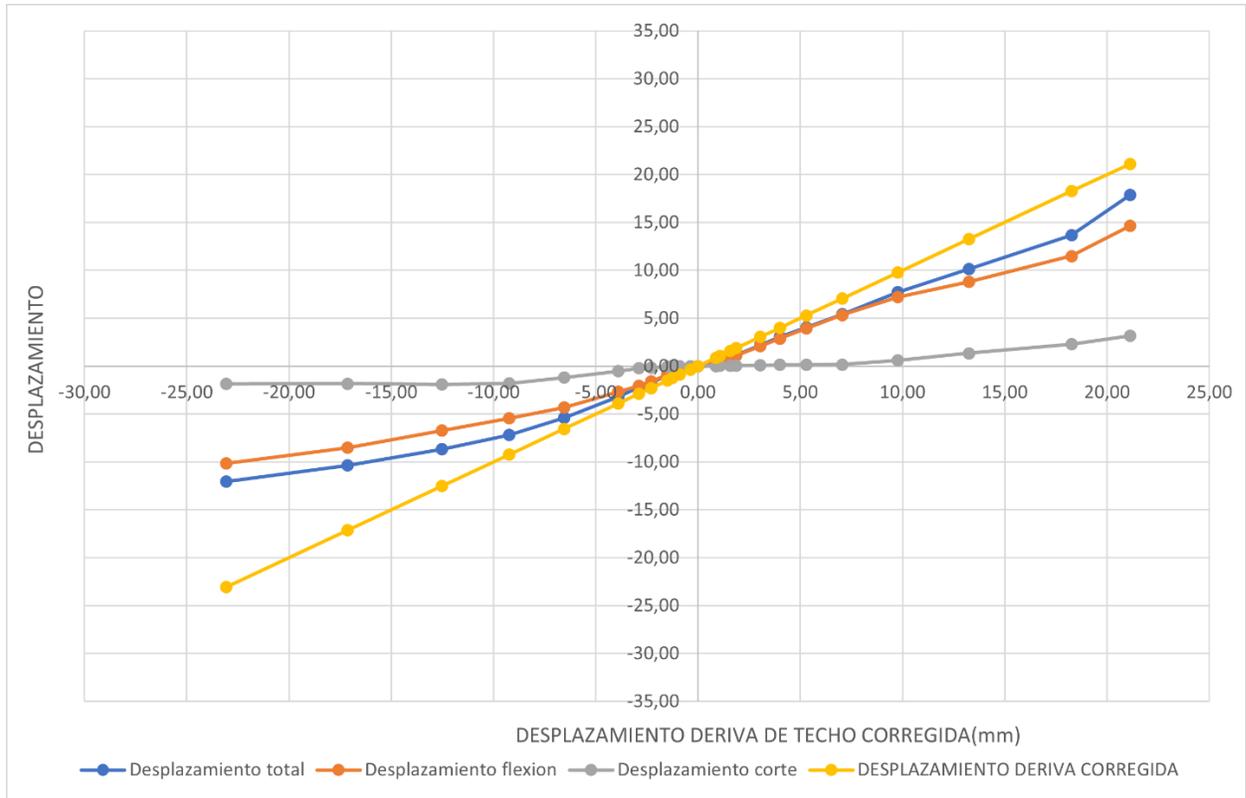


Figura 5.13 Contribuciones de Desplazamiento por Flexión y Corte Muro con fibras.

En la Figura 5.13 se muestran las contribuciones al desplazamiento por Flexión y Corte hasta la deriva de 2,0%, ya que pasada esta deriva el registro de los sensores muestra un desplazamiento exagerado debido a que el muro pierde el recubrimiento en donde los LVDT se encuentran sujetos y por ende los sensores se sueltan y deja de ser representativo el registro. Los peaks se obtienen de los Anexo C y Anexo D y se observa que la mayor contribución es causada por la Flexión al igual que en el Muro sin fibras, observando una contribución ínfima al Corte.

5.3.2. Deformaciones unitarias en altura

Para las deformaciones unitarias del Muro con fibras, se aplicó la misma corrección en tracción que para el primer ensayo, no obteniendo los resultados esperados en las deformaciones unitarias, por lo que estas no se mostraran en esta memoria.

5.3.3. Evolución de daño Muro Alternativo

El desarrollo de grietas comienza al final del primer ciclo en la deriva de 0,3% con un leve descascaramiento de la pintura blanca debido a una fisura diagonal en el centro del muro, casi imperceptible a simple vista. Es recién en el segundo ciclo de la deriva 0,5% en donde esta fisura comienza a hacerse más notoria, agrandándose hacia el lado Este del muro. En el primer ciclo de la misma deriva además se pueden notar nuevas grietas diagonales en el lado Este del muro cerca de la base, cuando el muro se encuentra en el extremo contrario.

En el tercer ciclo de la deriva 0,4% se comienza a observar una grieta de manera horizontal en la zona Oeste del muro cercano a la base.

Para la deriva de 0,75% se logra observar que existe un aumento en el tamaño de las grietas, como se muestra en rojo para la Figura 5.14

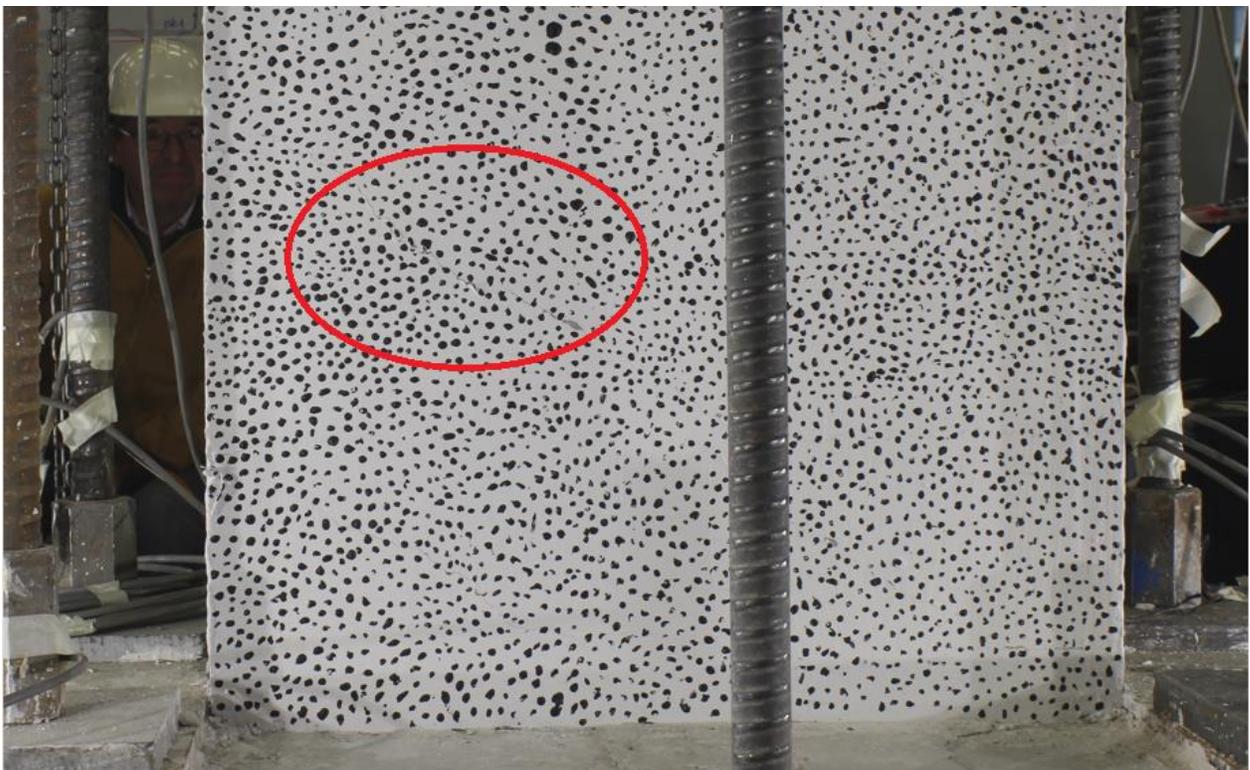


Figura 5.14 Primer ciclo 0,75% (peak Oeste).

No es sino hasta el primer ciclo de la deriva 1,25% donde se logra observar una nueva grieta horizontal en la zona Oeste del muro a 20 [cm] por sobre la base. A partir de esta deriva, se entra al rango no lineal, comienza la fluencia. En la Figura 5.15 se muestra que el Muro Alternativo a diferencia del primer experimento, se encuentra en buen estado al final de la deriva 2,0%

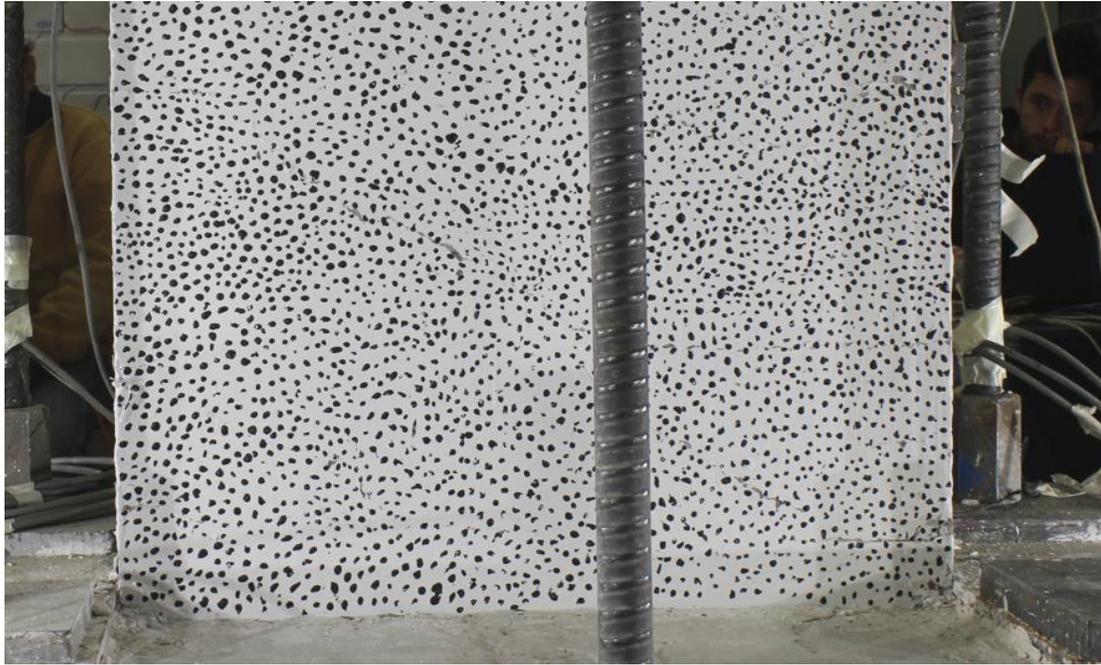


Figura 5.15 Termino de la deriva 2,0% (Centro).

En la deriva del 2,5%, como se muestra en la Figura 5.16, Figura 5.17 y Figura 5.18, se observa que en el segundo ciclo existe descascaramiento y apertura del muro en la base por el lado Suroeste, esto debido a que la armadura transversal que pasa por esa zona no se encontraba bien ubicada permitiendo el pandeo de las barras longitudinales en ese borde. Mientras que en el otro extremo se observan grietas, pero no perdida del recubrimiento, ya que por este lado la armadura transversal si se encuentra en su posición correcta.

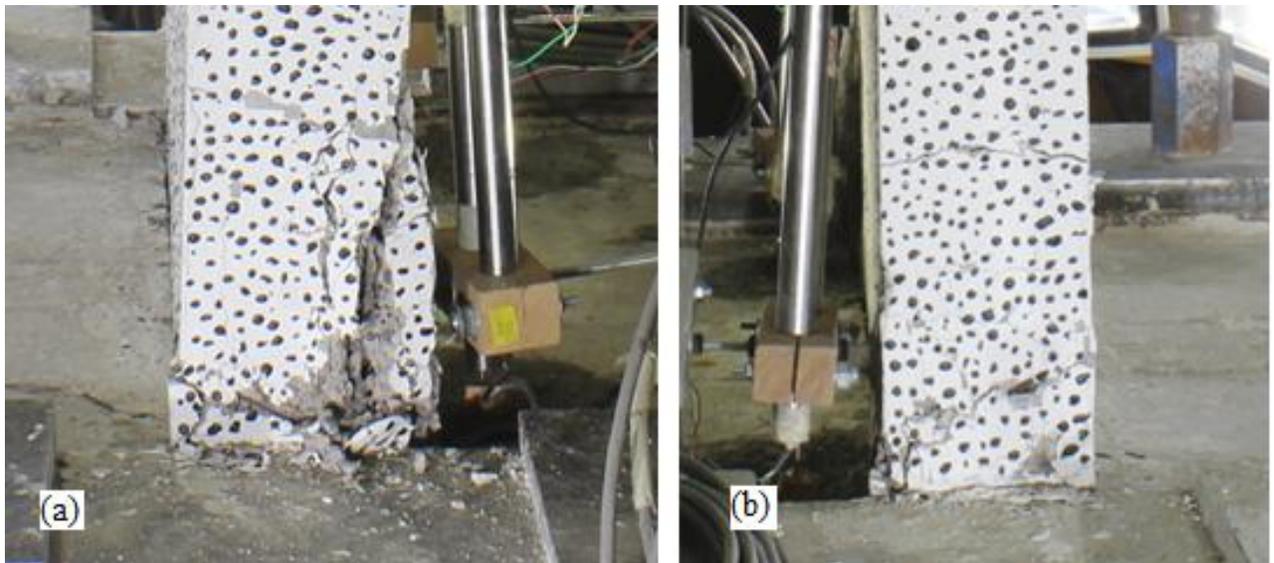


Figura 5.16 (a) Lado Oeste - (b) Lado Este. Deriva 2,5%.



Figura 5.17 Lado Este, tercer ciclo 2,5% (peak Oeste).



Figura 5.18 Lado Oeste, tercer ciclo 2,5% (peak Este).

En el primer ciclo de la deriva 3,2% como se muestra en la Figura 5.19, se comienza a descascarar el borde del muro por el lado Este, dejando descubierta la armadura transversal. En el segundo ciclo de esta deriva, se acentúa la pérdida de recubrimiento en la base del muro, permitiendo pandeo y corte de una de las barras longitudinales de repartición.



Figura 5.19 Pérdida recubrimiento lado Este, deriva 3,2%.

Durante el primer ciclo de la deriva 4,0% (último ciclo del ensayo), mostrado en la Figura 5.20 y Figura 5.21, se produce el corte de una de las barras de borde longitudinales $\phi 12$ luego de llegar al peak del lado Oeste, lo cual provoca una pérdida de carga. Esto es visible en el lado negativo de la curva carga-desplazamiento (Figura 5.12).



Figura 5.20 Pandeo y corte de barras longitudinales, deriva 4,0%.



Figura 5.21 Base Muro al término del ensayo, lado Norte.

5.4. Análisis Comparativo

En la siguiente sección se realiza un análisis comparativo del desempeño de los muros ensayados. En la Figura 5.22 se observa la curva carga-desplazamiento de ambos muros, dejando en evidencia las principales diferencias de resistencia y ductilidad entre ambos muros. Para hacer el análisis se tomará en cuenta solo el lado negativo de la curva, ya que, en el ensayo del muro sin fibras, por una falla en la ecuación de corrección 5.1 se cargó un lado menos que otro, resultando en una asimetría entre ambas direcciones.

En la Figura 5.22, se observa que los desplazamientos máximos que registra el sensor para cada Muro son de; 32 [mm] para el Muro Sin Fibras alcanzados en la deriva de 2,5%, mientras que para el Muro Con Fibras el desplazamiento máximo alcanzado es de 52 [mm] en el primer ciclo de la deriva de 4,0%.

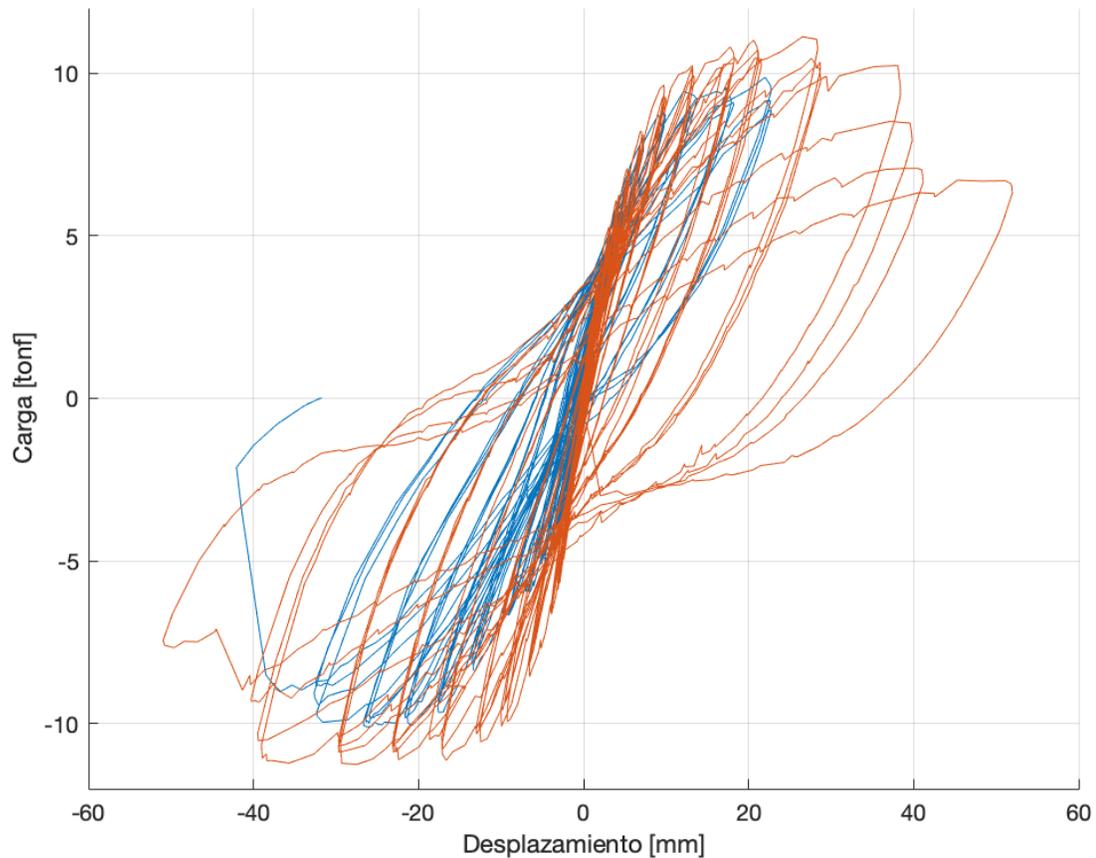


Figura 5.22 Comparación Curvas Carga-Desplazamiento Muro Sin Fibras v/s Muro Con Fibras.

5.4.1. Resistencia y Rigidez

A continuación, se realiza un análisis comparativo de las resistencias máximas de cada muro. Es importante señalar que para ambos muros la resistencia máxima alcanzada en el sentido negativo (Este) difiere del máximo alcanzado en el sentido positivo (Oeste). De la Tabla 5.4 se observa que el Muro sin fibras alcanza una resistencia máxima de 10 [tonf], mientras que el Muro con fibras de acero alcanza una resistencia máxima de 11,3 [tonf], siendo esta un 13% mayor a la del primer muro. El Muro sin fibras de acero alcanza su resistencia máxima en el primer ciclo de la deriva 1,6%, mientras que el Muro con fibras alcanzó su resistencia máxima en el primer ciclo de la deriva 3,2%.

Tabla 5.4 Resistencia Máxima MC y MA.

Muro	Carga Máxima [tonf]
Sin fibras	10
Con fibras	11.3

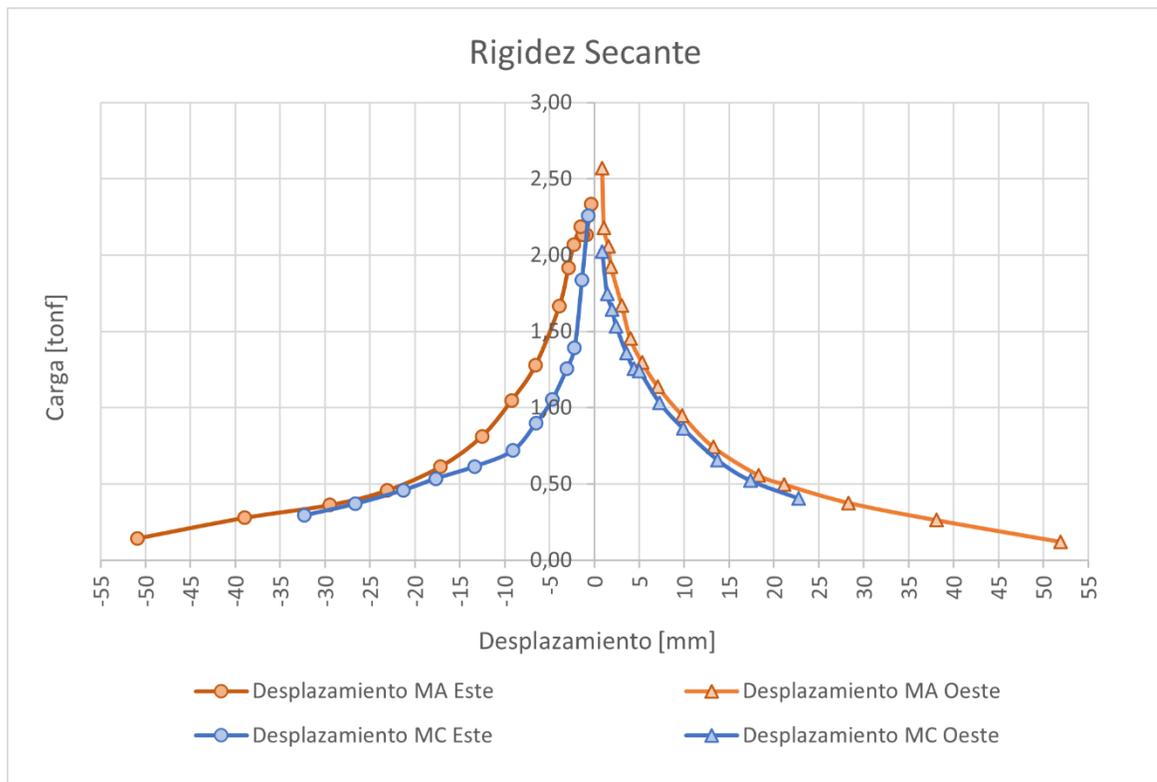


Figura 5.23 Comparación Curvas de Rigidez Muro sin fibras y Muro con fibras.

En la Figura 5.23, las curvas en color naranja representan los resultados obtenidos para el Muro con fibras de acero, mientras que las curvas en azul muestran los resultados para el Muro sin fibras. Se observa que, cuando se aplica el mismo desplazamiento en el lado Este, el Muro con fibras exhibe una mayor rigidez en comparación con el Muro sin fibras. Por otra parte, en el lado Oeste, donde el primer muro experimentó desplazamientos menores de lo esperado, se aprecia

una rigidez superior a la de su lado Este, siendo esta muy similar a la del Muro con fibras. Aunque la rigidez del segundo muro es ligeramente superior, es evidente que ambas son muy similares.

5.4.2. Deriva de techo y Disipación de energía

La deriva máxima corresponde al desplazamiento de techo máximo alcanzado por el muro antes de que falle. Para el Muro sin fibras de acero esta deriva corresponde al 2%, lo que equivale a 32,3 [mm] mientras que para el Muro con fibras de acero esta deriva corresponde al último ciclo del 3,2% lo que equivale a 41,2 [mm], esto antes de que ambos muros degraden el 20% de su resistencia máxima alcanzada en el ensayo. Para obtener la variación de ductilidad a partir del gráfico Carga v/s Desplazamiento en la Figura 5.22 se deben encontrar dos puntos, el punto de desplazamiento en donde cambia la pendiente de la curva envolvente (punto de Fluencia) y el punto de desplazamiento en donde el muro pierde un 20% de la resistencia máxima. Luego, se divide el punto último en el punto de fluencia. Para obtener la variación, se divide el resultado de ambos muros obteniendo que el Muro Con Fibras de Acero tuvo una ductilidad un 64% mayor a la del Muro Sin Fibras. Para obtener la energía disipada por el Muro sin fibras en este gráfico, se ocupa solo el lado negativo de la curva carga desplazamiento de la Figura 5.2 y se duplica, como si el lado positivo de esta misma curva hubiese sido simétrico a su contraparte negativa.

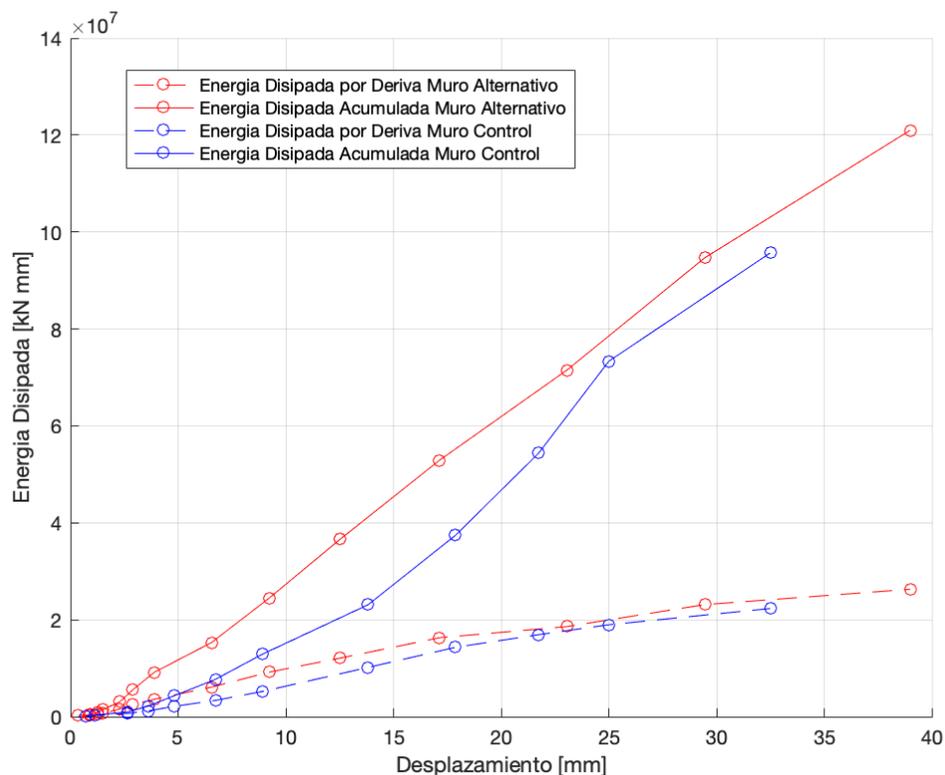


Figura 5.24 Energía Disipada MC y MA.

En cuanto a la energía disipada por los muros, en la Figura 5.24 se observa el progreso de disipación de energía. Las líneas punteadas indican la cantidad de energía disipada en cada deriva, mientras que la línea continua lleva el registro de la energía disipada acumulada durante el ensayo. El criterio utilizado para calcular la energía corresponde al área bajo la curva del gráfico carga vs desplazamiento hasta antes que el muro degrade el 20% de carga. Vemos que la energía disipada por deriva hasta la deriva de 2,0% se mantiene en rangos similares. Esto debido a la similitud de las rigideces de ambos muros. En la curva carga-desplazamiento mostrada en la Figura 5.22, se observa en el lado negativo que el comportamiento de ambos muros es semejante hasta la deriva de 2,0%, siendo el Muro con fibras de acero levemente superior. En concreto, el Muro con fibras disipó un 26,5% más de energía que el Muro sin fibras antes de la falla durante el ensayo.

Capítulo 6

Conclusiones

Chile, debido a su ubicación en una región de alta actividad sísmica, enfrenta desafíos constantes en el campo de la ingeniería. Esto demanda que la ingeniería del país esté a la vanguardia, desarrollando soluciones innovadoras que estén a la altura de estos desafíos. En este contexto, uno de los enfoques adoptados en Chile para la construcción de estructuras sismorresistentes es la utilización de sistemas de muros, con el objetivo de prevenir fallas frágiles y mejorar la capacidad de las estructuras para resistir eventos sísmicos. Para lograr esto, se emplea una técnica conocida como "detallamiento de borde" en muros, la cual busca aumentar la ductilidad y la capacidad de deformación de estas estructuras.

Este trabajo de memoria de título tiene como objetivo proporcionar resultados experimentales sobre una propuesta de diseño alternativo que investiga el impacto de la adición de fibras de acero en muros estructurales sin detallamiento de borde. Para llevar a cabo este estudio, se construyeron dos muros esbeltos con misma geometría y un diseño de armadura de repartición del alma idéntica, además de igual armadura transversal conformada por dos elementos en forma de J que se unen por fuera de la armadura longitudinal. La diferencia clave radica en que el muro propuesto con diseño alternativo incorpora una cuantía de fibras de acero del 0,8%. A pesar de que la geometría y la cantidad de armadura son las mismas en ambos muros, se logra observar una respuesta global diferente. En primera instancia esto se observa en el Muro sin fibras de acero ya que el protocolo de carga no se lleva a cabo de manera correcta debido al error en la ecuación de corrección, el cual se logra corregir para el segundo ensayo. En segundo lugar, se logra apreciar que ambos muros poseen modos de falla distintos. El Muro sin fibras de acero tiene una falla de manera frágil, perdiendo resistencia abruptamente, mientras que el muro con fibras de acero falla por fatiga y rotura de su armadura longitudinal.

El Muro sin fibras alcanza un nivel de resistencia máxima de 10 [tonf]. Esta resistencia la alcanza en la deriva 1,6%. El muro falla luego de completar los tres ciclos de la deriva del 2% e intentar llevar el muro en dirección Este, donde se cargó más en comparación con su lado opuesto, observando una caída abrupta en la resistencia y por ende una falla frágil. La falla ocurre por la pérdida de recubrimiento del lado Este y el pandeo de sus barras longitudinales.

El Muro con fibras de acero alcanza una resistencia máxima de 11,3 [tonf], un 13% más que el muro sin fibras. Su resistencia máxima la alcanza en la deriva de 3,2%. El muro logra completar satisfactoriamente esta deriva y un ciclo completo de la deriva de 4%, para luego fallar después del corte de una de sus barras longitudinales de borde y una de las barras de repartición del alma. Las fibras mostraron ser muy útiles para postergar la pérdida de recubrimiento en las zonas de la rótula plástica, creando una especie de confinamiento en esta zona la cual permitió una pérdida progresiva en la resistencia, evitando el modo de falla frágil observado en el Muro sin fibras. Una vez que el muro pierde su recubrimiento, la fibra deja de servir ya que la armadura queda expuesta y al no tener confinamiento, falla poco después. El Muro con fibras de acero presenta un aumento de ductilidad del 64% y una disipación de energía 26,5% mayor que el Muro sin fibras.

Por otra parte, las deformaciones unitarias obtenidas por los sensores en la base del muro no son representativas, ya que los resultados se ven influenciados por los movimientos entre el muro y su propia fundación a pesar de ser desplazamientos pequeños.

En cuanto a la metodología de ensayo con fundaciones reutilizables, se obtienen resultados aceptables ya que se logran obtener desplazamientos pequeños tanto en deslizamiento donde se obtuvo 2,2 [mm] como para levantamiento que se obtuvo 2,9 [mm] del muro en comparación con sus fundaciones, esto gracias a una buena fijación de las cuñas de corte y de la placa que se utiliza como restricción de levantamiento.

Se comprueba que la metodología de diseño de muros con fibras de acero Dramix 3D 65/35 genera un aumento de ductilidad y disipación de energía al igual que un aumento en la capacidad de resistencia, por lo que se considera una posible mejora al rendimiento de muros esbeltos. Sin embargo, no logra ser un reemplazo al detallamiento de borde especial que requieren los muros ya que no se observa un aumento significativo en la capacidad de resistencia. Mas sirve como un buen refuerzo a las zonas de borde ya que si se observa que contribuye a una formación de grietas progresiva y pérdida de recubrimiento más lenta.

Recomendaciones Futuras

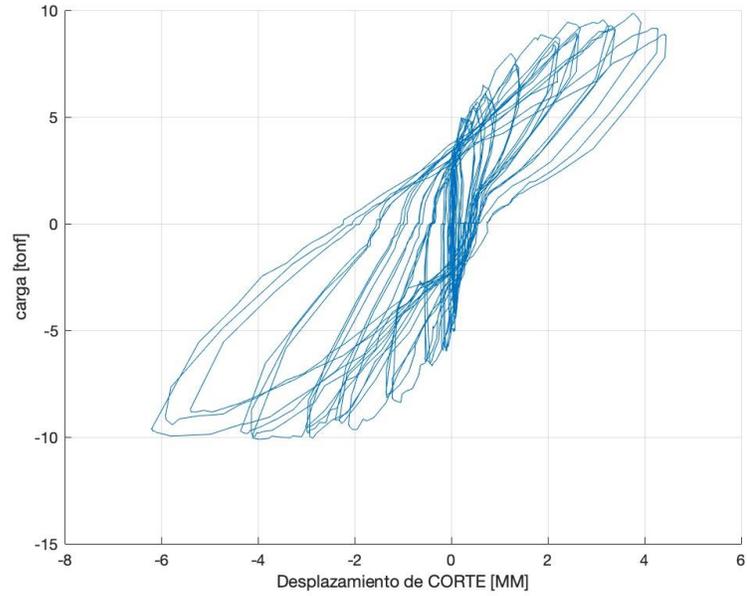
Dentro de las dificultades presentadas en el ensayo y posterior análisis de resultados, se tiene que la colocación de los sensores LVDT en la base del muro deben ir sujetos al mismo muro y no a las fundaciones, ya que existe movimiento el cual se ve reflejado alternado los resultados arrojados por estos sensores. Por lo que para futuras investigaciones con esta metodología se recomienda poner más varillas de hilos sin fin, ubicando a mayor altura la sujeción de los sensores y poniendo otro hilo sin fin que vaya unido también al muro sin que estorbe con la fundación. Por otra parte, los sensores ubicados en los costados de las fundaciones deben ir lo más arriba posible con el fin de registrar todo el movimiento que ocurre en estas. Además, verificar las cargas de postensado luego de montado todo, ya que se observó en otros ensayos que producto de la manipulación de los equipos estas cargas se sueltan. Por último, chequear bien la colocación de las cuñas de corte ya que juegan un rol fundamental a la hora de minimizar los errores por deslizamiento.

Bibliografía

- Bekaert. (2012). *Reinforcing the future Dramix*®.
- Concha, F. (2023). *Caracterización del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero dramix 3D 65/35*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192776>
- Duque, K. (2011). *Clásicos de Arquitectura: Conjunto Residencial Torres de Tajamar / Luis Prieto Vial & BVCH | ArchDaily en Español*. <https://www.archdaily.cl/cl/02-126059/clasicos-de-arquitectura-torres-de-tajamar-luis-prieto-vial-b-v-c-h>
- Lagos, R., Lafontaine, M., Bonelli, P., Boroschek, R., Guendelman, T., Massone, L. M., Saragoni, R., Rojas, F., & Yañez, F. (2021). The quest for resilience: The Chilean practice of seismic design for reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*, 37(1), 26–45. <https://doi.org/10.1177/8755293020970978>
- Massone, L. M. (2013). Fundamental principles of the reinforced concrete design code changes in Chile following the Mw 8.8 earthquake in 2010. *Engineering Structures*, 56, 1335–1345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.013>
- 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). <https://doi.org/10.1193/1.4000046>
- Moreno Almansa, E., & Cánovas, M. F. (1997). *Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Singh, H. (2017). *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design*. <http://www.springer.com/series/13593>
- Wallace, J. W., & Massone, L. (2004). *Load-Deformation Response of Slender Reinforced Concrete Walls*.

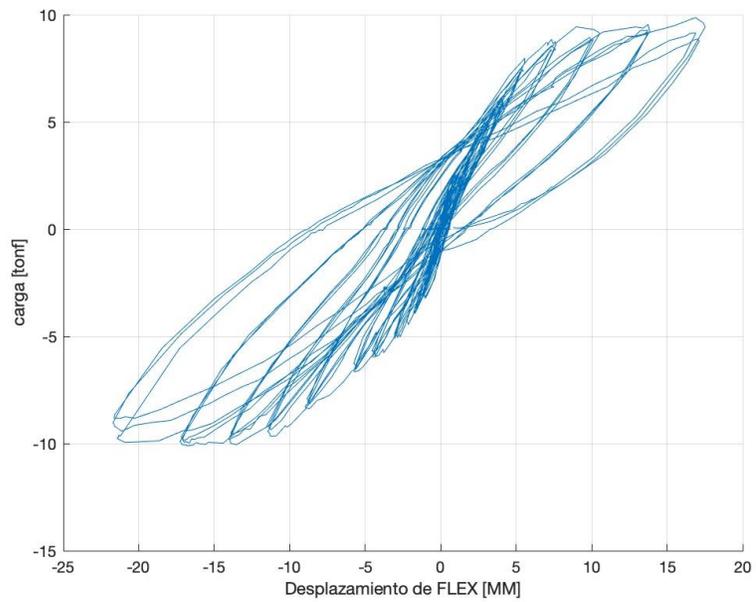
ANEXOS

Anexo A



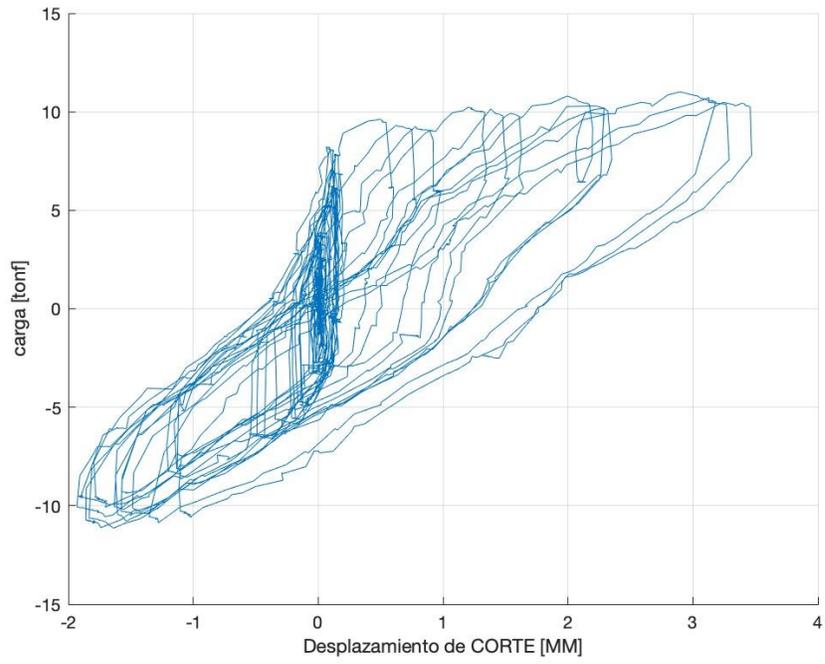
Curva Carga-Desplazamiento de Corte Muro Sin Fibras.

Anexo B



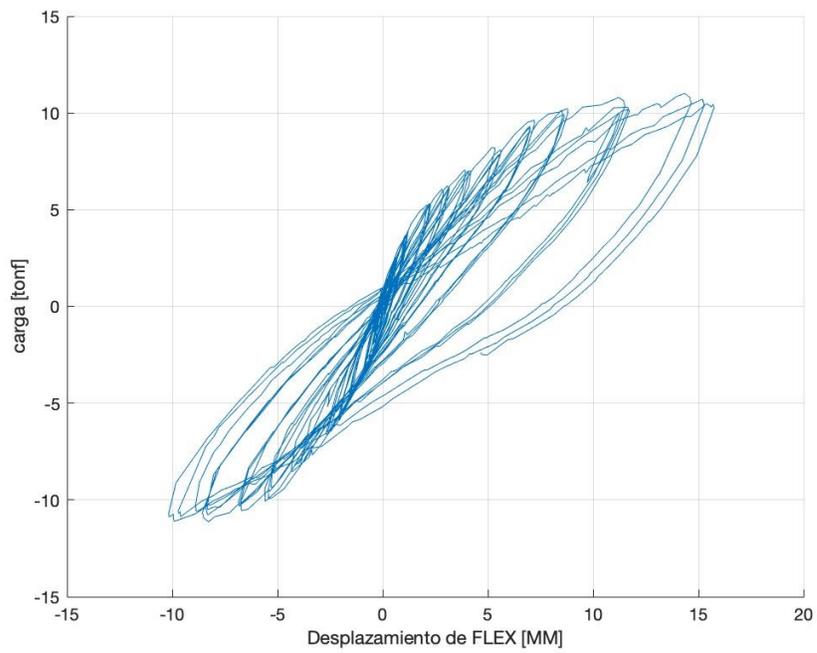
Curva Carga-Desplazamiento de Flexión Muro Sin Fibras.

Anexo C



Curva Carga-Desplazamiento de Corte Muro Con Fibras.

Anexo D



Curva Carga-Desplazamiento de Flexión Muro Con Fibras.