



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

RESPUESTA EXPERIMENTAL DE MURO DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE PVA ANTE CARGAS CICLICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

BRYAN STEPHEN CIFUENTES LLEWELLYN

PROFESOR GUÍA:
FABIAN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SANCHEZ
CARLOS SEPULVEDA SORUCO

Este trabajo ha sido financiado por FONDECYT N°1200023

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
CON MENCION EN ESTRUCTURAS, CONSTRUCCION Y GEOTECNIA.

ESTUDIANTE: Bryan Stephen Cifuentes Llewellyn

FECHA: 2023

PROFESOR GUÍA: Fabian Rojas Barrales

RESPUESTA EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE PVA ANTE CARGAS CICLICAS

A lo largo de la historia de la construcción, se han utilizado diversos materiales para la creación de elementos estructurales. El descubrimiento del hormigón representó un avance importante, aunque su debilidad en tracción y falta de ductilidad llevaron a fallas frágiles. Para superar estos desafíos, se adoptó el hormigón armado, junto con la investigación, en fibras como una alternativa. Las fibras de PVA (Polivinilo Alcohol) han surgido como un material prometedor debido a sus destacadas propiedades mecánicas, como alta capacidad de tracción y alargamiento. Debido a esto, se decide realizar el estudio de las fibras de PVA como un refuerzo para aplicarlos en elementos estructurales, que en este caso son los muros esbeltos, sin confinamiento y con malla doble, ensayándolos mediante fundaciones reutilizables y postensadas, con el propósito de reciclar distintos elementos estructurales de hormigón, para sacarle provecho y ahorrar en material.

En el siguiente documento, se presenta un análisis comparativo de la influencia de las fibras de PVA, en muros para una cuantía del 1,8%, ante demandas cíclicas en el plano de este muro.

En este estudio cuantitativo, se evidencia la presencia de dos fallas: a) falla por flexión, que se presentó en el muro de hormigón normal, la cual es característica en muros esbeltos y b) una falla por fatiga, debido a la rotura de una barra longitudinal producido por el alto desplazamiento en la parte superior del muro (49,45 [mm]). Por otro lado, aunque no resultó una simetría en derivas con respecto al muro de hormigón normal, se pudo realizar un análisis comparativo donde se vislumbró que el muro de hormigón con fibra de PVA obtuvo una diferencia en ductilidad de un 134,18%, con respecto al muro base. Otro factor por considerar fue la resistencia máxima que presentó el muro de hormigón con fibra de PVA, 11[tonf], el cual representa un aumento del 10% con respecto al muro convencional. Dicho aumento, también se vio reflejado en la rigidez, al estar aumentado en el mismo porcentaje. Sin embargo, al tratarse de energía de disipación, se tuvo que emular una condición en la Curva Capacidad vs Deriva del muro tipo para todos los ciclos, producto de la asimetría en las derivas que ocurrió en el ensayo, cuya diferencia fue del 37,13% favorable al muro de hormigón con fibras de PVA.

Mediante el catastro en terreno, se plasma que el uso de fibras como refuerzo, logra distribuir de mejor manera las grietas, evitando una mayor apertura entre ellas. No obstante, ante lo anterior aún no se puede aseverar que el hormigón con fibra PVA, pueda reemplazar el material de acero en el muro.

Le dedico esta memoria primeramente a Dios que me dio la vida y todo lo que soy hasta ahora, a mi madre por su paciencia, a mi padre por su fortaleza, a mi hermana por su compañía y a mis abuelos que están cuidándome desde el cielo.

*“CAMINANTE, NO HAY CAMINO.
SE HACE CAMINO AL ANDAR.
AL ANDAR SE HACE CAMINO.
Y AL VOLVER LA VISTA ATRÁS.
SE VE LA SENDA QUE NUNCA.
SE HA DE VOLVER A PISAR”*

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por acompañarme en todo el proceso de esta vida universitaria, desde que di la prueba PSU hasta ahora, que estoy entregando mi memoria de título. Además, agradezco a mis padres, por su apoyo, entrega, esfuerzo, dedicación y perseverancia en brindarme todo lo que he necesitado en mi proceso como estudiante universitario, fortaleciéndome emocionalmente y conteniéndome en los momentos en que pensé desistir de mi vocación. A mi hermana mayor, por estar conmigo en los momentos difíciles.

Agradezco a los profesores Fabian Rojas y Leonardo Massone, por guiarme a lo largo de esta memoria de título, dándome consejos certeros y precisos, que me permitieron reflexionar sobre mis competencias, capacidades y habilidades que fui desarrollando en el proceso.

También, quiero mencionar a mis amigos Diego Araya, Javier Lobos, Cristóbal Pérez y Matías Videla, que me brindaron palabras de aliento, para seguir en el arduo camino del estudio en los momentos en que más lo requerí y por los buenos momentos que pasamos en la vida universitaria.

Agradezco a Francisco y Sebastián, por estar dispuestos en los días importantes para el desarrollo de este proyecto y además, por su gran simpatía y carisma cuando conversábamos en el campus.

No quiero finalizar estas dedicatorias, sin agradecer a las incansables oraciones de mi abuela Estela Catalina Llewellyn, quien siempre deseo ver a su nieto profesional y a mi abuelo Gabriel Llewellyn, quien fue el primero en abrirme camino en el mundo de la ingeniería y los inventos. Un beso al cielo para ambos.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo Principal	2
1.1.2.	Objetivos Secundarios.....	2
1.2.	Alcances	2
1.3.	Estructura de la memoria	3
CAPÍTULO 2	MARCO TEÓRICO	4
2.1.	Propiedades del hormigón	4
2.2.	Propiedades mecánicas de fibras para refuerzo	5
2.3.	Comportamiento mecánico de hormigón reforzado con fibras (FRC)	7
2.4.	Hormigón reforzado con fibras de PVA (PVA SNFRC)	8
2.5.	Influencia del tamaño máximo del árido.....	9
2.6.	Implicancia del Diseño de Muros Sin Detallamiento de Borde.....	10
CAPÍTULO 3	DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS.....	13
3.1.	Caracterización de materiales	15
3.1.1.	Acero	15
3.1.2.	Hormigón.....	16
3.2.	Construcción de probetas	19
3.2.1.	Fase de enfierradura	19
3.2.2.	Fase de moldaje	22
3.2.3.	Fase de hormigonado.....	24
3.2.4.	Fase de reparación	27
CAPÍTULO 4	MONTAJE EXPERIMENTAL	28
4.1.1.	Actuador horizontal	31
4.1.2.	Gatos hidráulicos.....	34
4.1.3.	Postensado de barras de acero.....	34
4.1.4.	Sistema de carga axial	38

4.1.5.	Marco de acero y restricción lateral	39
4.1.6.	Instrumentación	41
4.1.6.1.	Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT)	41
4.1.6.2.	Sistema de adquisición de datos	43
4.1.6.3.	Fotogrametría	45
4.1.7.	Ensayo experimental	46
CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES		47
5.1.	Introducción	47
5.2.	Respuesta global del muro de hormigón normal	50
5.3.	Evolución de daño en el muro base.	52
5.4.	Respuesta global del muro de hormigón con fibras de PVA	59
5.5.	Evolución de daño en muro de hormigón con fibras de PVA	62
5.6.	Análisis comparativo	69
5.6.1.	Rigidez	70
5.6.2.	Resistencia y degradación	72
5.6.3.	Deriva de techo y disipación de energía	73
5.6.4.	Modo de falla	74
5.6.5.	Deformaciones unitarias	77
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES		78
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA		80
ANEXOS		82

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Tipos de fibras y sus propiedades [4].	5
Tabla 2.2: Propiedades de algunas fibras sintéticas para refuerzo [4-Chap 10.1]	8
Tabla 3.1: Diámetros de barras de acero utilizadas en la probeta(muro).	13
Tabla 3.2: Dimensiones de elementos estructurales para el montaje experimental.	14
Tabla 3.3: Resultados de ensayos a tracción a barras de acero utilizadas en probeta(muro).	15
Tabla 3.4: Resultados de resistencia a compresión de hormigón normal.	17
Tabla 3.5: Resultados de resistencia a compresión de hormigón con fibras de PVA.	18
Tabla 3.6: Dimensión de Apertura del tamiz.	18
Tabla 3.7: Análisis granulométrico del hormigón utilizado.	19
Tabla 3.8: Materiales utilizados para el moldaje.	23
Tabla 3.9: Propiedades de la fibra de PVA a utilizar.	24
Tabla 3.10: Cantidad de material utilizado en los muros de hormigón normal y hormigón con fibras de PVA.	24
Tabla 4.1: Protocolo de carga nominal.	33
Tabla 4.2: Carga axial impuesta en el muro.	39
Tabla 5.1: Protocolo de carga nominal modificado.	49
Tabla 5.2: Tabla de rigidez secante lateral - Muro de hormigón sin fibras PVA.	71
Tabla 5.3: Tabla de rigidez secante lateral - Muro de hormigón con fibras PVA.	71
Tabla 5.4: Degradación de la resistencia - Muro hormigón normal.	72
Tabla 5.5: Degradación de la resistencia - Muro hormigón con fibras PVA.	72

Índice de Figuras

Figura 2.1: Curva esfuerzo-deformación unitaria para concreto de densidad normal con $w_c = 2300$ kg/m ³ [1-Fig. 2.3]	4
Figura 2.2: Distintas formas de fibras [3-Fig. 2.3.1]	5
Figura 2.3: Respuesta de “Extracción de una sola fibra” o “Single Fibre Pull Out” [5-Fig. 3]	6
Figura 2.4: Curva típica de esfuerzo-deformación del hormigón simple (a), FRC (b) y HPFRC (c) [4-Fig. 1.1].	7
Figura 2.5: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC en compresión para volúmenes de fibra (V _{pf}) del 0,0.5 y 1% con relaciones de A/C de 0.45 (Serie A) y 0.38(Serie B) [6-Fig 3(a) y (e)]	8
Figura 2.6: Efecto del tamaño máximo del árido ante ensayos a compresión [8-Fig. 4]	9
Figura 2.7: Plano de Edificio Alto Rio en Concepción (Construido el 2007). [Figura 3(b)-16].....	10
Figura 2.8: Daños típico en muros de corte. [Figura 1-15].....	11
Figura 2.9: Refuerzo del muro delimitador: a) vista general y b) fractura y pandeo. [Figura 2-15]	11
Figura 3.1: Plano de muro, medidas en [mm]......	14
Figura 3.2: Ensayo a tracción de barras de acero.....	15
Figura 3.3: Ejemplo de probetas cilíndricas.	16
Figura 3.4: Montaje de ensayo a compresión de probetas cilíndricas.....	17
Figura 3.5: Corte (Izquierda) y doblado (Derecha) de enfierradura.....	20
Figura 3.6: Construcción del armazón estructural.	20
Figura 3.7: Esqueleto estructural colocado en presentado en el moldaje.	21
Figura 3.8: Plano de moldaje del muro.	22
Figura 3.9: Moldaje de muro previo al hormigonado.	23
Figura 3.10: Fibra de PVA larga (izquierda) y depósito de Fibras PVA en betonera(derecha).....	25
Figura 3.11: Enrasado final en superficie de la probeta.....	26
Figura 3.12: Nuevo método de enrasado de la probeta.	26
Figura 3.13: Lugares de reparación para probeta de hormigón normal.....	27
Figura 4.1: Plano en planta del laboratorio de estructuras "Arturo Arias"	28
Figura 4.2: Muro de reacción(izquierda) y losa(derecha) del laboratorio.	29
Figura 4.3: Puente de grúa Kixio del laboratorio de estructuras.	29
Figura 4.4: Montaje experimental.....	30
Figura 4.5: Actuador horizontal.....	31
Figura 4.6: Rotulas de conexión del actuador horizontal.....	31

Figura 4.7: Bomba hidráulica del actuador horizontal.	32
Figura 4.8: Protocolo de ensayo.	33
Figura 4.9: Gatos hidráulicos.	34
Figura 4.10: Postensado de barras de acero transversales a las fundaciones.	35
Figura 4.11: Postensado de barras de acero ancladas a losa del laboratorio.	36
Figura 4.12: Postensado de barras de acero transversales a viga de transferencia.	37
Figura 4.13: Placas de postensado en viga de transferencia, placa normal(izquierda) y placa modificada(derecha).	37
Figura 4.14: Sistema de carga axial.	38
Figura 4.15: Marco de acero (izquierda) y puntales (derecha).	39
Figura 4.16: Cuñas de anclaje a losa del marco de acero.	40
Figura 4.17: Colocación del actuador horizontal.	40
Figura 4.18: Pedestal independiente para los sensores externos a la probeta(izquierda) y el soporte de los sensores en el pedestal(derecha).	41
Figura 4.19: Esquema de ubicación para los LVDT's del muro. Vista Sur(A), Vista Este(B) y Vista Oeste(C).	43
Figura 4.20: Caja de conexión (izquierda) y fuente de alimentación (derecha).	44
Figura 4.21: Chasis, modulo Adquisición de datos y fuente de poder.	44
Figura 4.22: Superficie pintada de grillas de puntos negros ante una superficie blanca para fotogrametría.	45
Figura 5.1: Convención de ejes positivos.	47
Figura 5.2: Modelo de flexión que tiene en cuenta el desplazamiento vertical. [14-Fig. 9].	48
Figura 5.3: Corrección de desplazamiento de techo Muro hormigón armado.	50
Figura 5.4: Curva de capacidad vs desplazamiento de techo corregido Muro hormigón normal.	51
Figura 5.5: Grafico de desplazamientos de flexión, corte y total con respecto al desplazamiento de techo - Muro de hormigón normal.	52
Figura 5.6: Visualización de grietas en el primer ciclo del desplazamiento peak Oeste – 0,5% (4,99 [mm]).	53
Figura 5.7: Evolución de grietas para 0,75% (6,88 [mm]), 1% (9,54 [mm]) y 1,25% (12,98 [mm]) en desplazamiento peak Oeste.	54
Figura 5.8: Evolución de grieta por pandeo de barra longitudinal en los desplazamientos del tercer ciclo 1,6% (25,00 [mm], izquierda) y primer ciclo 2,00% (32,49 [mm], derecha) en dirección Este ambas.	54

Figura 5.9: Proceso de desprendimiento del hormigón y exposición de las barras longitudinales de borde en los primeros dos ciclos del 2,00% (32,49 [mm]) dirección Este y el tercer ciclo del 2,00% (21,80 [mm]) dirección Oeste, orden de izquierda a derecha.	55
Figura 5.10: Evolución de grietas en el tercer ciclo del 2,00% (21,80 [mm]) en dirección Oeste.	55
Figura 5.11: Estado final del muro hormigón normal, vista Lado norte.	56
Figura 5.12: Pandeo de barras de borde, lado oeste del muro.....	56
Figura 5.13: Evolución de grietas diagonales en el primer ciclo de los 0,75% (13,82 [mm]) y 1,0% (17,88 [mm]) de desplazamiento de techo en dirección Este.	57
Figura 5.14: Evolución de grietas en lado Oeste del muro ante desplazamientos de techo de 1,25% (21,74 [mm], foto izquierda) y 1,6% (25,00 [mm], foto derecha) en dirección Este.	58
Figura 5.15: Evolución de grietas en desplazamientos peaks Este(izquierda) y Oeste(derecha) durante el tercer ciclo para los desplazamientos de techo de 2,00% (32,49 [mm]) y 2,00% (21,80 [mm]) respectivamente.....	58
Figura 5.16: Corrección de desplazamiento de techo en Muro hormigón con fibras PVA.....	59
Figura 5.17: Curva de capacidad vs desplazamiento de techo corregido Muro hormigón armado con fibra PVA de refuerzo.....	60
Figura 5.18: Evolución de rotación varilla de LVDT en el primer ciclo del 2,0% y 2,5% en dirección Este, y posición central en el tercer ciclo del 3,2% (de izquierda a derecha)	61
Figura 5.19: Grafico de desplazamientos de flexión, corte y total con respecto al desplazamiento de techo - Muro de hormigón con fibras PVA.....	61
Figura 5.20: Grietas superficiales en el primer ciclo del 0,75% en dirección Oeste(izquierda) y Este(derecha).....	62
Figura 5.21: Grietas por flexión en el primer ciclo del 1,00% en dirección Oeste(izquierda) y Este (derecha).....	62
Figura 5.22: Evolución de grietas en el primer ciclo del 1,25% y 1,60% de drift en dirección Este, Vista Sur.	63
Figura 5.23: Evolución de grietas en el primer(izquierda) y tercer(derecha) ciclo del 1,6% en dirección Oeste y Este respectivamente.	63
Figura 5.24: Desarrollo de la grieta horizontal en tercer ciclo del 2%(izquierda) y primer ciclo del 2,5%(derecha), ambos desplazamientos en dirección Este.	64
Figura 5.25: Trabajo de las fibras de PVA en el primer ciclo 2,5% en dirección Este.....	64
Figura 5.26: Pandeo de barra longitudinal de borde en segundo ciclo del 2,5% en dirección Oeste. Vista Oeste(izquierda), vista Sur (al medio) y vista Norte(derecha).	65
Figura 5.27: Desarrollo de daño del muro en lado Oeste durante Primer(izquierda), segundo (al medio) y tercer(derecha) ciclo del 2,5% en dirección Este.	65
Figura 5.28: Pandeo local de barras longitudinales de borde en cara Este del muro. Primer, segundo y tercer ciclo (de izquierda a derecha) de 3,2% en dirección Este.	65

Figura 5.29: Desprendimiento de lado Este del muro por pandeo de barras longitudinales. Vista Sur(izquierda), vista norte (al medio) y vista Este(derecha).	66
Figura 5.30: Evolución de grietas en desplazamiento Oeste(izquierda) y Este(derecha) del tercer ciclo de 3,2%.	66
Figura 5.31: Corte de la barra phi6 longitudinal e inclinación de barras longitudinales fuera del plano.	67
Figura 5.32: Evolución de grietas en desplazamientos peaks Este(izquierda) y Oeste(derecha) durante el tercer ciclo del drift 4%.	67
Figura 5.33: Primer ciclo en dirección Este con 5% de drift, vista Norte.	68
Figura 5.34: Primer ciclo en dirección Este con 5% de drift, vista Norte, lado Oeste(izquierda) y Este(derecha).	68
Figura 5.35: Pandeo de barras longitudinales de borde en cara norte del muro post-ensayo. ...	69
Figura 5.36: Curva comparativa de capacidad vs desplazamiento de techo.	69
Figura 5.37: Curva de rigidez del muro de hormigón y muro hormigón con fibras PVA.	70
Figura 5.38: Grafico comparativo de disipación de energía.	74
Figura 5.39: Modo de falla – Muro hormigón normal.	74
Figura 5.40: Pandeo de barras longitudinales de borde - Muro hormigón normal.	75
Figura 5.41: Modo de falla – Muro hormigón con fibras PVA.	76
Figura 5.42: Pandeo de barras longitudinales de borde - Muro hormigón con fibras PVA, Vista Oeste (izquierda) y Este(derecha) del muro.	76
Figura 5.43: Estado final de daño en muro Hormigón normal (izquierda) y Muro de hormigón con fibras de PVA (derecha), lado Este del muro.	77
Figura 7.1: Plano de plancha de acero para sistema de carga axial.	A-1
Figura 7.2: Plano de plancha de acero para postensado vertical a losa de laboratorio.	A-2
Figura 7.3: Plano de armadura para ambos muros (medidas en [mm])	A-3
Figura 7.4: Plano de armadura para ambos muros (medidas en [mm]) - Vista en Planta.	A-4

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de la historia de la construcción, se han utilizado distintos materiales para construir elementos estructurales, tales, como, albañilería, arcilla, piedra, entre otros. Sin embargo, el descubrimiento del hormigón abrió puertas tanto para construir elementos estructurales gigantescos como también el desarrollo de la tecnología de dicho material. El hormigón es un material frágil, con buena capacidad a compresión, pero baja en tracción y presenta baja ductilidad lo cual produce una mayor facilidad en la velocidad de propagación de grietas (falla frágil), por lo cual, una de las primeras soluciones para mejorar este defecto fue la implementación de barras de acero, denominándose hormigón armado, el cual es altamente utilizado en las construcciones de edificios, pavimentos, etc.

En la actualidad, al utilizar el acero como principal agente de mejora ante la baja capacidad de tracción del hormigón, produce un mayor costo a medida que se utiliza más de dicho material, por lo que se ha desarrollado una investigación en las fibras de distinto material para analizar sus propiedades mecánicas y con ello adicionarlas al hormigón como refuerzo.

Últimamente, se han desarrollado diferentes estudios acerca del uso de hormigón con fibras para refuerzo. Estas fibras son elementos discontinuos los cuales, al mezclarse con el hormigón, generan varias propiedades mecánicas con el fin de mejorar los defectos del hormigón normal. Donde el material más investigado son las fibras de acero, de vidrio, entre otras. Sin embargo, el uso de las fibras de PVA está surgiendo con mucha fuerza, debido a sus grandes propiedades mecánicas, tales como su gran capacidad a la tracción, y alargamiento, convirtiéndolo en un material con gran potencial.

Dado que el uso de la fibra ha sido analizado recientemente, hay pocas investigaciones acerca de la fibra sintética de PVA (Polivinilo Alcohol), es por ello, que abarca un montón de posibilidades acerca de su uso. Dichos usos, han sido de observar el comportamiento en la mezcla como reforzamiento, pero se han realizados pocos artículos en la aplicación para elementos estructurales como son los muros, losas, entre otros.

Dicho esto, para la presente memoria se investigará el uso de una cuantía determinada de fibra de PVA (1.8 %) como refuerzo para un elemento estructural ante cargas cíclicas, el cual será un muro que estará diseñado sin confinamiento y se realizará una comparación de las propiedades mecánicas, entre un muro con fibras de PVA y un muro de hormigón común mediante sensores LVDT y fotogrametría. Además, estos muros se ensayarán mediante un montaje experimental, que constara en agrupar elementos estructurales al muro, es decir, utilizando el “método sándwich” mediante el postensado de barras de acero, se unirán las fundaciones y vigas de transferencia al muro, generando de esta forma una reutilización del hormigón.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Principal

Estudiar la respuesta experimental de dos muros de hormigón, uno sin fibras y el segundo con una cuantía determinada de fibras de PVA ante cargas cíclicas, para establecer la influencia de la cuantía de fibras en la capacidad de deformación de los elementos, en la ductilidad y en la disipación de energía.

1.1.2. Objetivos Secundarios

- Realizar la revisión del estado del arte de las propiedades del hormigón con reforzamiento de fibras, las propiedades de las fibras de PVA y la implicancia de muros sin detallamiento de borde en Chile.
- Diseño y construcción de las probetas a ensayar, de acuerdo con los requerimientos del laboratorio.
- Desarrollar el montaje experimental e instrumentación para ambas probetas.
- Procesamiento de datos.
- Caracterización de la influencia en la cuantía de fibras de PVA con respecto a la capacidad de deformación, ductilidad y control de daño para distintas demandas cíclicas.

1.2. Alcances

El trabajo de título se basa en la construcción de dos probetas, los cuales serán muros que presentarán la misma geometría y armadura. El diseño de la armadura constará en no presentar un detallamiento de borde, es decir, se construirán dos probetas sin confinamiento. Además, dichas probetas tendrán una diferencia en su composición de mezcla, ya que, una tendrá hormigón normal, mientras que otra será formada por hormigón con fibras de PVA como refuerzo. Donde, serán ensayadas ante cargas cíclicas.

Para esto, la memoria consistirá en una revisión bibliográfica, donde se realizará la lectura de varias investigaciones relacionadas con el uso de fibras de PVA y sus propiedades mecánicas. En paralelo, se procura en diseñar las probetas de acuerdo con los requerimientos del laboratorio. Además, el trabajo incluye la cotización de materiales para la construcción de las probetas y posterior ensayo de estas. Estos ensayos, serán realizados en el laboratorio de IDIEM, ubicado en Plaza Ercilla 8833. Para finalizar, con el análisis de datos y describirlos en el trabajo de título.

1.3. Estructura de la memoria

1. INTRODUCCIÓN

Se detallan las razones que dan impulso a la exploración del tema de la memoria, además de exponer los propósitos que se pretenden lograr durante el desarrollo del proyecto y la estrategia metodológica que se empleará.

2. MARCO TEÓRICO

Se presentan conclusiones de investigaciones previas realizadas por diferentes autores que guardan una relación directa con el progreso de la memoria actual.

3. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE PROBETAS

Se explica con detalle la manera en que se han dispuesto y configurado los refuerzos de los muros, al tiempo que se muestran los resultados de los análisis de materiales y los parámetros importantes que se han obtenido. También se proporciona información sobre el enfoque y el proceso seguido en la construcción de los muros.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se ofrece una descripción de la estrategia de trabajo empleada en el laboratorio. Igualmente, se detalla minuciosamente los componentes utilizados para la configuración, así como los instrumentos empleados para la captura de datos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se exhiben los gráficos que representan la relación entre la capacidad y el desplazamiento para cada uno de los muros sometidos a pruebas. También se analiza el comportamiento global de los muros y cómo evolucionan las fisuras en cada caso, además de explorar sus modos de falla particulares. Finalmente, se efectúa una comparación entre ambas muestras.

6. CONCLUSIONES

Se exponen las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Propiedades del hormigón

El hormigón es un material semejante a la piedra y es el material más utilizado en la construcción, el cual está conformado por la mezcla de cemento, arena y grava u otro agregado, y agua. Sin embargo, esta mezcla debe ser hecha muy cuidadosamente, dado que, si unos de estos materiales constitutivos son depositados en la mezcla con mayor o menor proporción de lo diseñado, esto afecta tanto en la trabajabilidad como en las propiedades mecánicas de dicho material.[1]

Las propiedades del hormigón dependerán tanto de la relación agua/cemento(dosificación), la cantidad de áridos finos y gruesos, las condiciones de humedad y temperatura, de la adición de aditivos y de los procesos tanto de hormigonado como de curado. Por otra parte, dado que sus propiedades son similares a la piedra, este material presenta una buena capacidad a compresión la cual se consigue a los 28 días desde el proceso de hormigonado, donde su valor varía entre 5-60 (MPa), sin embargo, posee una baja capacidad a la tracción, y al llegar a su resistencia máxima, esta presenta una mayor fragilidad, ya que no tiene una gran capacidad a la deformación, por lo tanto, no es flexible, concluyendo que posee una baja ductilidad.[1]

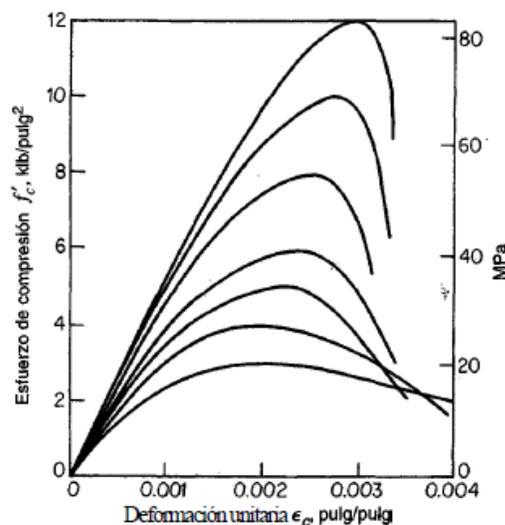


Figura 2.1: Curva esfuerzo-deformación unitaria para concreto de densidad normal con $w_c = 2300 \text{ kg/m}^3$ [1-Fig. 2.3]

2.2. Propiedades mecánicas de fibras para refuerzo

Las fibras son elementos discontinuos que se distribuyen aleatoriamente en las mezclas de cemento o aglomerantes, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de un material que presenta baja capacidad de deformación y tracción como lo es el cemento. Cabe destacar, que el uso de las fibras remonta desde tiempos antiguos, como es el caso de la paja para los ladrillos de barro, sin embargo, no se avanzó en la investigación de las fibras hasta los últimos años. El primer material para la fibra fue el asbesto, no obstante, mediante investigaciones de salud, se determinó que no se utilizara, por lo tanto, las investigaciones se enfocaron en buscar materiales alternativos como las fibras de acero, vidrio, sintéticas, entre otros.[2]

Tal investigación se ha hecho en la búsqueda de distintos materiales para usarlos como fibras, que se ha investigado que la eficiencia de la matriz con fibras dependerá principalmente de la forma/geometría, material de fabricación y del tipo de unión(dispersión) que tengan con la matriz (Figura 2.2).



Figura 2.2: Distintas formas de fibras [3-Fig. 2.3.1]

En la actualidad, al realizar investigaciones de los materiales para utilizarlo en fibras se han obtenidos datos, los cuales se presentarán en la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Tipos de fibras y sus propiedades [4].

Tipo de fibra	Resistencia a tracción [Mpa]	Módulo de Young [Gpa]	Elongación máxima [%]	Gravedad específica
Acrílico	210-410	2	25-45	1.1
Asbesto	550-960	80-135	~0.6	3.2
Algodón	410-685	5	3-10	1.5
Vidrio	1030-3790	70	1.5-3.5	2.5
Nylon	760-830	4	16-20	1.1
Poliéster	720-860	8	11-13	1.4
Polietileno	~690	0.1-0.4	~10	0.95
Polipropileno	550-690	3	~25	0.90
Seda artificial	410-620	7	10-25	1.5
Lana mineral	480-760	70-120	~0.6	2.7
Acero	280-2760	200	0.5-35	7.8

Para que el hormigón reforzado con fibras (FRC) posea un buen rendimiento, la relación la matriz-fibra debe ser muy importante, por ende, se debe realizar un comportamiento de cómo reacciona esta unión con la aplicación de carga, la cual la realizaron y describieron Khan y Ayub[5]. En esta investigación, se realizó un ensayo llamado “extracción de una sola fibra” o “single fibre pull out” para observar dicho comportamiento, donde observaron que presenta 3 etapas (Figura 2.3):

1° Etapa: Prevalece la deformación elástica de la fibra que está parcialmente separada debido a la separación estable entre la fibra y la matriz. Este comportamiento será evidente hasta alcanzar el punto de carga en el que se produce el desprendimiento (P_a).

2° Etapa: Se presenta un descenso desde el punto de carga en el que se produce el desprendimiento (P_a) hasta el punto en el que la fibra se separa por completo de la matriz (P_b). Esto demuestra que la separación entre la fibra y la matriz se ha completado.

3° Etapa: La fibra puede exhibir una de las tres respuestas las cuales son: “endurecimiento por deslizamiento” ($\beta > 0$), “fricción constante” ($\beta = 0$) o “ablandamiento por deslizamiento” ($\beta < 0$).

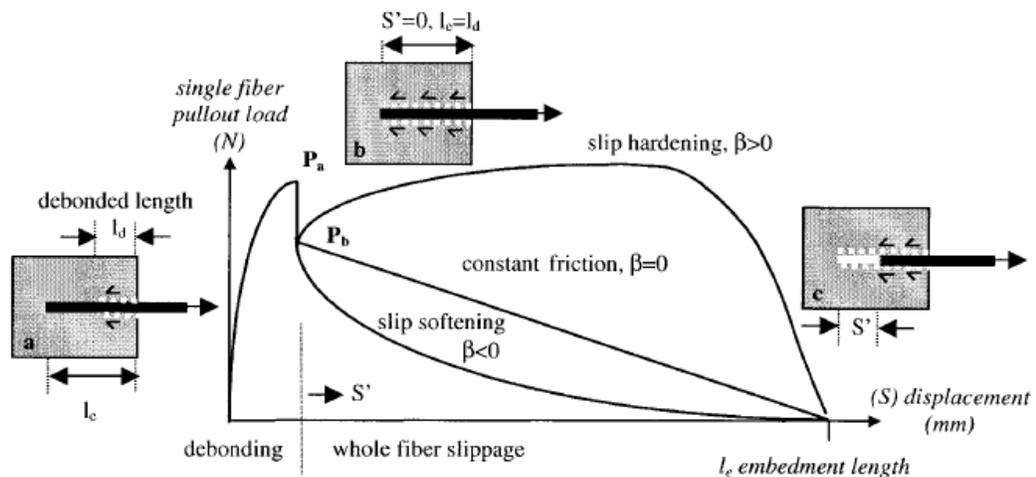


Figura 2.3: Respuesta de “Extracción de una sola fibra” o “Single Fibre Pull Out” [5-Fig. 3]

2.3. Comportamiento mecánico de hormigón reforzado con fibras (FRC)

Como se ha mencionado en la sección anterior, la adición de las fibras en el hormigón es utilizada con el fin de mejorar las propiedades mecánicas. Es por esto, que en la investigación de Bentur. A. y Mindess S. [4], observan que el hormigón con fibras presenta 3 comportamientos, los cuales dependerán de la cantidad de adición de fibra a la matriz, la forma y material que pose dicha fibra (Figura 2.4).

Los 3 comportamientos que se observaron son los siguientes:

1.- **Hormigón simple o normal (Caso a):** Hormigón que no presenta fibra de refuerzo, por lo tanto, es un material frágil posterior al peak de resistencia, lo cual ante su baja ductilidad la pérdida de carga es disminuye drásticamente.

2.- **FRC (Caso b):** Hormigón reforzado con fibras, cuyo volumen de fibras son menores al 2%, presenta una disminución paulatina de la carga post fisuración y una mayor ductilidad ya que presenta una respuesta de “ablandamiento por deformación”, sin embargo, si la tensión se mantiene mientras aumenta la deformación, entonces, la respuesta cambiara a una de “endurecimiento por deformación”. La utilización de FRC son en control de grietas de losas y pavimentos.

3.- **HPFRC (Caso c):** Hormigón reforzado con fibras de alto rendimiento, donde el volumen de fibra es del 5%, ya que en estos casos las fibras, serian utilizadas como refuerzo primario. En este caso, se utiliza tal cantidad de fibras, para aumentar tanto la resistencia como la tenacidad (“endurecimiento por deformación”) del compuesto. Sin embargo, hoy en día, hay una nueva generación de HPFRC, en base a formulaciones avanzadas de fibras y matrices que soportan altas cargas o deformaciones locales elevadas, para obtener un endurecimiento por deformación a volúmenes de fibras cercanos al 2%. Por lo general, la utilización de HPFRC son en revestimiento de túneles, pilotes prefabricados y a estructuras resistentes a explosiones.

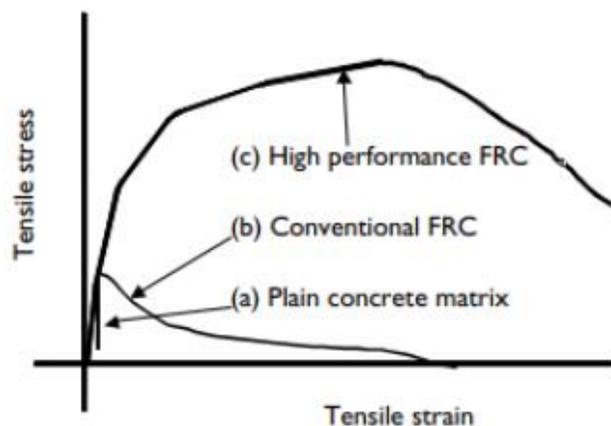


Figura 2.4: Curva típica de esfuerzo-deformación del hormigón simple (a), FRC (b) y HPFRC (c) [4-Fig. 1.1].

2.4. Hormigón reforzado con fibras de PVA (PVA SNFRC)

La investigación teórica plantea que, para aumentar la resistencia de los componentes, las fibras deben poseer un módulo de elasticidad mayor que la matriz. Sin embargo, para módulos de elasticidad cementosos que se encuentran entre 15 y 40 [GPa], es muy difícil que la mayoría de las fibras sintéticas cumplan con esa condición (Tabla 2.2). Por ende, se han desarrollado fibras de alta tenacidad para el refuerzo del hormigón, donde el término de “alta tenacidad”, quiere decir, que son fibras de un alto módulo de elasticidad y alta resistencia. No obstante, comparando la teoría con lo empírico, se ha demostrado que incluso presentando menor módulo de elasticidad que el cemento, se obtienen mejoras considerables en la capacidad de deformación, tenacidad, resistencia al impacto y el control de grietas de los compuestos FRC. Por lo que, en la mayoría de las aplicaciones, estas mejoras en las propiedades mecánicas, es más importante que un pequeño aumento en la resistencia a la tracción o a la flexión. [4-Chap 10.1]

Tabla 2.2: Propiedades de algunas fibras sintéticas para refuerzo [4-Chap 10.1]

Material de la fibra	Diámetro [μm]	Gravedad específica [g/cm ³]	Resistencia a tracción [GPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Deformación última [%]
Acrílico	20-350	1.16-1.18	0.2-1.0	14-19	10-50
Nylon	23-400	1.14	0.75-1.0	4.1-5.2	16-20
Polipropileno	20-400	0.9-0.95	0.45-0.76	3.5-10	15-25
Polivinilo de alcohol (PVA)	14-650	1.3	0.8-1.5	10-45	3-6
Acero (por comparación)	100-1000	7.84	0.5-2.6	210	0.5-3.5
Matriz de cemento		1.5-2.5	0.003-0.007	10-45	0.03

Según la Figura 2.5, el hormigón reforzado con fibras de PVA (PVA SNFRC), demuestra que el aporte de la fibra se presenta en la fase de agrietamiento, donde en la fase elástica, la pendiente de caída de carga es menor a medida que aumenta el volumen de fibra de PVA [6]. Por lo tanto, esto demuestra la mejora en ductilidad gracias a la incorporación de fibras.

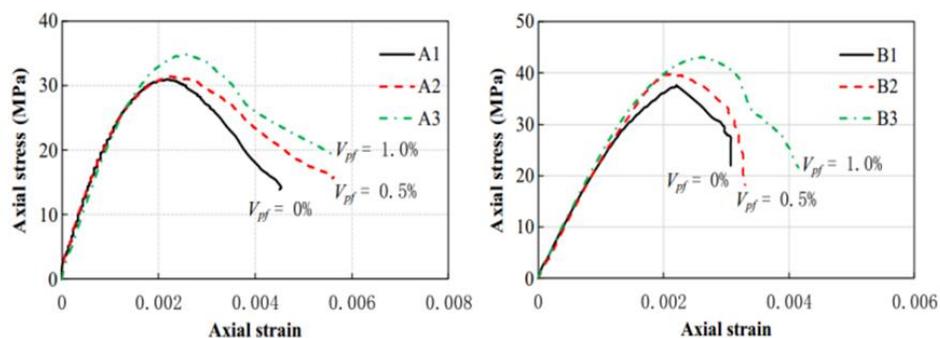


Figura 2.5: Curvas de esfuerzo-deformación de PVA-FRC en compresión para volúmenes de fibra (V_{pf}) del 0,0,0,5 y 1% con relaciones de A/C de 0.45 (Serie A) y 0.38(Serie B) [6-Fig 3(a) y (e)]

2.5. Influencia del tamaño máximo del árido

Si bien el hormigón debe ser resistente ante elementos estructurales, para que obtenga una resistencia deseada, los tamaños del árido son importantes ya que se busca un empaquetamiento compacto entre el cemento, agua y agregados, además, los áridos deben tener buena resistencia, durabilidad y resistencia a la intemperie. La gradación de los áridos se realiza mediante diferentes tamices que separan en áridos finos y áridos gruesos, donde las especificaciones de los tamices y requisitos de áridos de buena calidad se detallan en la norma ASTM C33[1]. Este procedimiento es uno de los factores más importantes en lo que respecta a la trabajabilidad de la mezcla.

El tamaño máximo del agregado se define como el tamaño de la malla del tamiz en la que se retiene el 15% o más de las partículas. Para el caso de hormigones de alta resistencia, se limita este tamaño máximo a 19 [mm]. En términos generales, a medida que aumenta el tamaño máximo de los agregados, se reduce la cantidad de superficie que la pasta de cemento debe cubrir por unidad de volumen para una relación agua/cemento dada. Esto tiene como resultado un ahorro económico [7].

Por otro lado, se ha hecho investigaciones con respecto a la relación de tamaño de árido con resistencia del hormigón, donde se concluyó que a medida que aumenta el tamaño del árido, aumenta la resistencia, sin embargo, llegado a un tamaño de árido más grande la resistencia no aumenta significativamente, por lo tanto, hay un punto donde se obtiene el tamaño del árido óptimo [8], como se aprecia en la Figura 2.6.

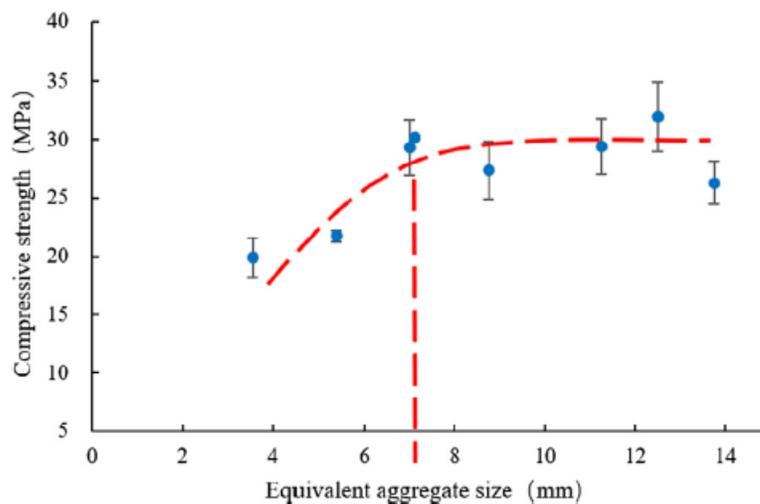


Figura 2.6: Efecto del tamaño máximo del árido ante ensayos a compresión [8-Fig. 4]

2.6. Implicancia del Diseño de Muros Sin Detallamiento de Borde.

La forma predominante de construcción en Chile, son los edificios de hormigón armado (RC), que utilizan muros estructurales para resistir cargas laterales, en edificios de más de cuatro pisos. Cuando Chile adoptó un nuevo código de concreto en 1996 cuya base fue ACI318-95, los requisitos para refuerzo transversal estrechamente espaciado en los límites de los muros fueron excluidos, debido a la observación del buen desempeño de los edificios RC en el terremoto de marzo de 1985.

Los edificios típicos en Chile poseen una gran cantidad de muros de corte con un área total de muro sobre el área en planta, aproximadamente el 3% en cada dirección principal de un edificio. Aunque el área de las paredes se ha mantenido a través del tiempo, las construcciones más nuevas aumentaron el número de pisos (de 15 a 25), lo que conlleva a relaciones de carga axial de las paredes significativamente más altas. [15]

Las construcciones modernas se caracterizan por el uso de una distribución común: muros longitudinales a cada lado de un pasillo central que forma una columna vertebral y muros perpendiculares(transversales), o costillas como se observa en la Figura 2.7 . Así, los muros de cada principal dirección tienden a quedar conectados formando una T o una L. [16]

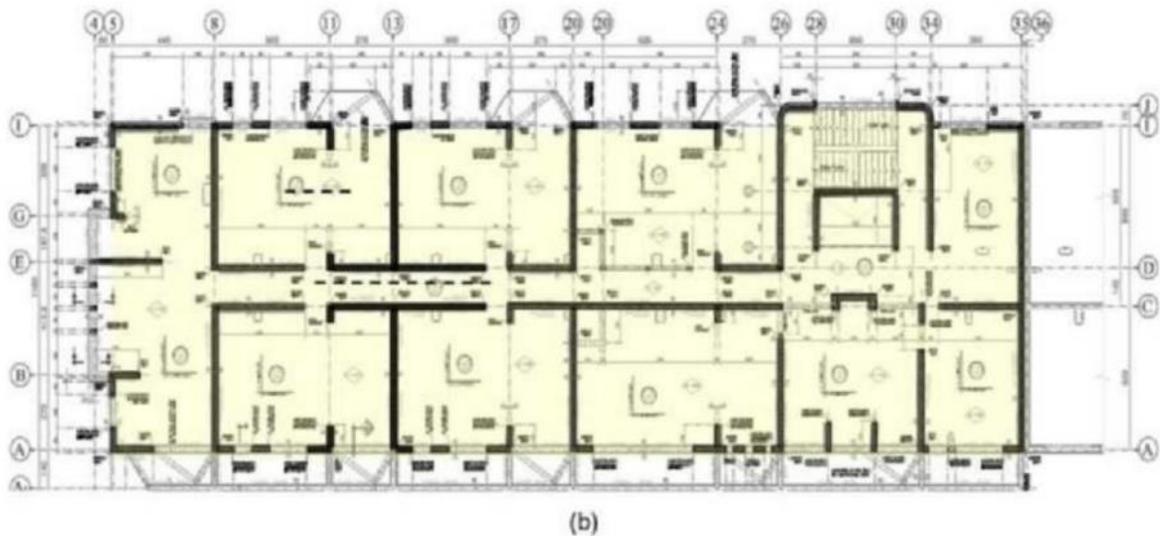


Figura 2.7: Plano de Edificio Alto Rio en Concepción (Construido el 2007). [Figura 3(b)-16]

El terremoto de 8,8 [Mw] ocurrido en febrero del 2010 en Chile mostró un gran daño estructural en las edificaciones modernas, donde las fallas típicas se observan en la Figura 2.8, causado por acciones de carga axial combinadas con flexión en muros, es decir, incremento del desplazamiento lateral del muro debido al terremoto. Además de un deficiente detallamiento de bordes, como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.8: Daños típicos en muros de corte. [Figura 1-15]

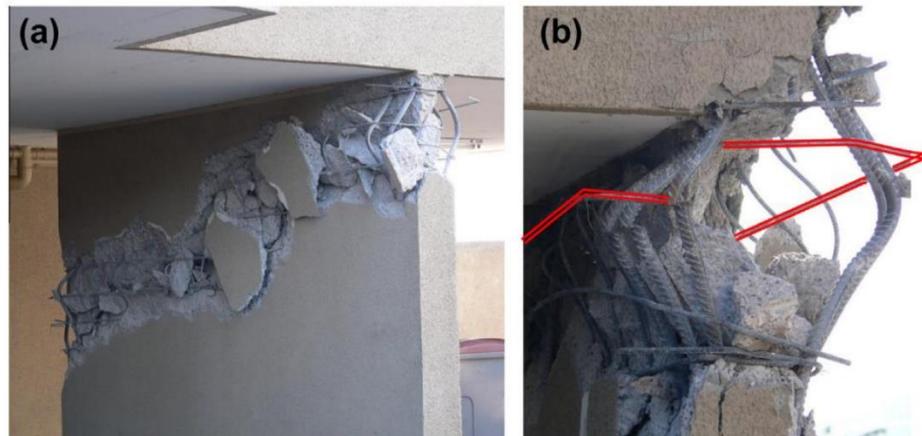


Figura 2.9: Refuerzo del muro delimitador: a) vista general y b) fractura y pandeo. [Figura 2-15]

Los daños observados en los modernos edificios RC, producidos por el terremoto del 2010, en Chile y la información recopilada de ellos, llevaron a cambios de la normativa existente en la ingeniería chilena como: diseño de hormigón armado (NCh430 of.2008) y diseño sísmico de edificios (Nch433 of.96). [15]

En cuanto a las modificaciones en el diseño estándar en hormigón armado se impusieron las limitaciones para un mejor comportamiento de dichos muros, cuyo reemplazo fue el DS N60. La normativa nueva utilizó el ACI 318-08, como código base e incluye modificaciones que se centran en el diseño especial de muro. [15]

Las principales modificaciones que se realizaron son [17]:

- 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 del muro.
- Se limita la máxima compresión en los muros de corte, especificando que $P_u \leq 0,3f'cA_g$.
- Se requiere confinamiento de los elementos de borde ($e \geq 30$ 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.

Capítulo 3

Diseño y descripción de las probetas

Como se busca una comparación de 2 muros sin confinamiento con la misma enfierradura, es importante clasificar las barras de acero, ya que, deben cumplir con ciertas restricciones del laboratorio, las cuales son: el espesor del muro (10 [cm]), 60 [cm] de largo, presente una resistencia mínima al corte de 8 [tonf] aproximadamente, sea de malla doble (ya que se busca representar un muro antes del terremoto 27-F-2010 en Chile), que posea refuerzo tanto la parte superior(viga de transferencia) como inferior(fundación) del muro, además de utilizar un $f'c$ igual a 20 [MPa] para el diseño.

Utilizando la normativa ACI 318-14[9], se realizó el diseño de la parte central del muro, la cual se presenta a continuación.

Tabla 3.1: Diámetros de barras de acero utilizadas en la probeta(muro).

Parte de la probeta	Barras longitudinales de borde	Barras longitudinales centrales	Malla horizontal	Trabas	Cuantía Vertical	Cuantía horizontal
Central (Muro)	2Ø12 y 2Ø6	2Ø6	Ø6@200mm doble	-	0,01	0,003

Como se indica en la Tabla 3.1, el montaje experimental requiere que la parte superior y fundación del muro estén reforzados, ya que se busca que resistan el postensado de las barras de aceros las cuales son Ø32, además de no presentar punzonamiento al momento del postensado. Como se indica en la Figura 3.1, en la parte superior y fundación, presentan orificios los cuales son de un diámetro de 50 [mm], este tamaño se realizó con el fin de que haya holgura con la barra de acero al momento de pasarlas entre los elementos estructurales y la probeta, para que al momento de realizar el ensayo, haya deslizamiento entre los elementos estructurales y no presente una rotación con respecto a una barra de postensado, ya que es muy riesgoso que las barras postensadas presenten esfuerzos de corte. Las dimensiones de la fundación del muro son 10 [cm] de espesor, 120 [cm] de ancho y 70 [cm] de alto, mientras que el muro presenta un espesor de 10[cm], 60[cm] de ancho y 145 [cm] de alto (Figura 3.1).

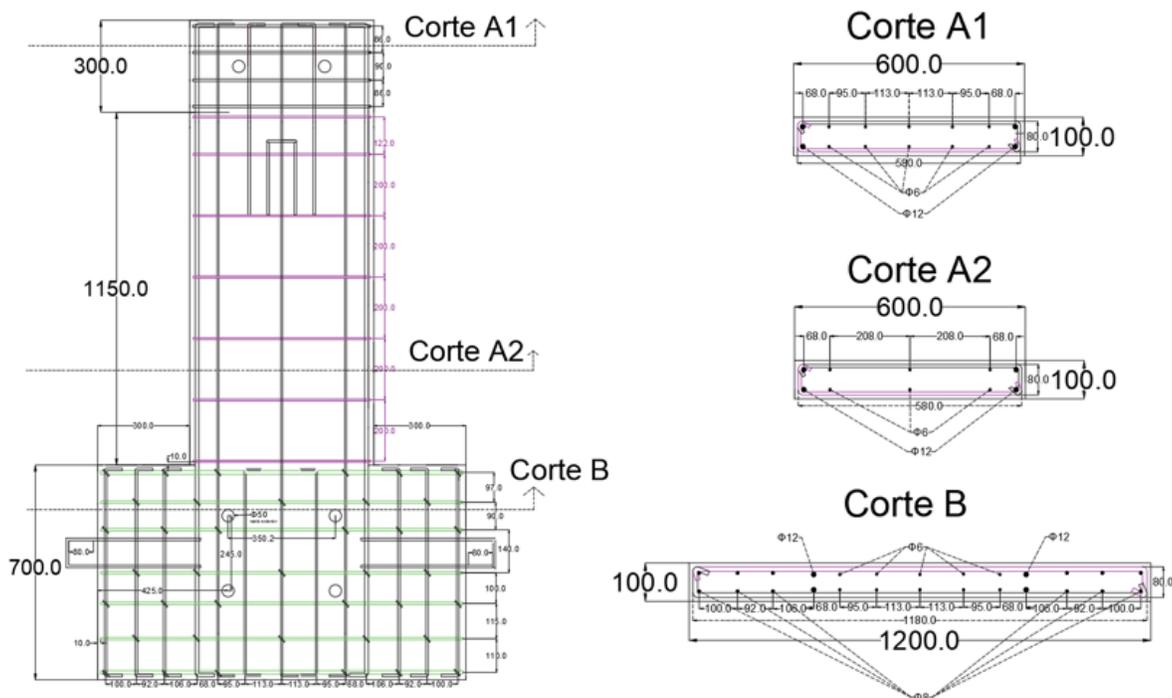


Figura 3.1: Plano de muro, medidas en [mm].

Con respecto a los elementos estructurales que cumplirán la función de las fundaciones reutilizables y postensadas son los siguientes:

Tabla 3.2: Dimensiones de elementos estructurales para el montaje experimental.

Tipo de elemento estructural	Largo [mm]	Alto [mm]	Espesor [mm]
Viga de transferencia	600	300	150
Fundación	1200	700	400

El hormigón que se utilizó para el diseño es un hormigón G20, donde el espaciamento mínimo entre los estribos es de 240 [mm] aproximadamente, no obstante, para términos más simples en la construcción de la probeta, se determinó un espaciamento de 200 [mm] entre los estribos de la zona central del muro (rotula plástica).

3.1. Caracterización de materiales

3.1.1. Acero

El acero que se utilizó para la construcción de la enfierradora de la probeta son A63-42H. Para la metodología de esta caracterización, se necesita 3 tramos de barras de acero de 15 [cm] cada uno, los cuales en este caso son $\varnothing 12$, $\varnothing 8$ y $\varnothing 6$. Estos datos son de vital importancia y deben ser obtenidos antes del ensayo para analizar el comportamiento que puede presentar durante el ensayo de la probeta y si cumplen con lo entregado por la maestranza.

Luego se coloca cada tramo de acero en la maquina universal, donde se inserta un extensómetro, cuya función es medir la deformación que presentara la barra de acero (Figura 3.2). Posteriormente, se determina la tasa de deformación, la cual es de 5[mm/min], con esto se trata de emular una condición cuasi-estática.



Figura 3.2: Ensayo a tracción de barras de acero.

Después de realizar el ensayo a tracción a las barras de acero se procede a graficar la curva tensión-deformación para observar su modulo elástico. Cabe recalcar que, superada la fluencia de las barras, la lectura de los datos es proporcionado por la maquina universal. A continuación, se presentan los datos de las barras de acero para los tres diámetros.

Tabla 3.3: Resultados de ensayos a tracción a barras de acero utilizadas en probeta(muro).

Diámetro	f_y [MPa]
$\varnothing 6$	846,8
$\varnothing 8$	804,8
$\varnothing 12$	794,1

3.1.2. Hormigón

Se utiliza un hormigón preparado BEMEZCLA H-30 cuya resistencia a los 28 días son 300 [kgf/cm²], el agua de amasado por saco esta entre 2.75 a 3.0 litros, su rendimiento es de 12 litros por saco y el tamaño máximo nominal del árido es de 8 [mm]. Cabe recordar, que la resistencia del hormigón para el diseño era de 20 [MPa], sin embargo, al no estar disponible en el sector, se utilizó este tipo de hormigón.

En la caracterización del hormigón de las probetas, primero, se preparan cilindros de 210 [mm] de altura y 105 [mm] de diámetro (relación de aspecto 2:1) donde dichas dimensiones son estipuladas en la norma Nch1017-2009. Luego, presentado por la norma Nch171-2008, estipula que una vez, hormigonada las probetas (muro de hormigón y muro de hormigón reforzado con fibras de PVA) debe realizarse una extracción del hormigón para verificar la resistencia a los 28 días (tiempo de máxima resistencia del hormigón) de curado de las probetas cilíndricas (Figura 3.3).



Figura 3.3: Ejemplo de probetas cilíndricas.

Posterior al periodo de maduración, son colocados en la maquina universal para ser ensayados a una tasa de deformación de 0.5 [mm/min] (caso de hormigón común) y 0.3 [mm/min] (caso de hormigón con fibras de PVA). Dado por el protocolo de ensayo, este se detiene cuando presente una degradación del 80% de su resistencia máxima. Con respecto a la deformación real de la probeta cilíndrica durante el ensayo, estos son medidos por 2 sensores LVDT a medida que el ensayo se desarrolla, mediante la maquina universal (Figura 3.4).



Figura 3.4: Montaje de ensayo a compresión de probetas cilíndricas.

Se realizaron 6 probetas cilíndricas para el muro de hormigón normal y 9 probetas para el muro de hormigón con fibras de PVA. La diferencia de cantidad se debe que, en la primera probeta-muro se realizaron 2 procesos de mezcla y en la segunda probeta-muro se realizaron 3 procesos de mezcla. Sin embargo, para la segunda probeta-muro (hormigón con fibras PVA), se realizaron 2 procesos de mezclado de hormigón con fibras de PVA y 1 proceso de hormigón común, el cual es depositado la mitad inferior de la fundación, ya que se decidió no utilizar fibras de PVA en la zona baja de la fundación del muro.

A continuación, se presentan la resistencia de las probetas cilíndricas para las dos probetas-muro.

Tabla 3.4: Resultados de resistencia a compresión de hormigón normal.

Cilindros	Resistencia f'_c [MPa]	Fecha de fabricación	Días de fraguado
1	18,21	25-Enero	70
2	21,26	25-Enero	210
3	21,67	25-Enero	210
4	22,17	25-Enero	210
5	17,14	25-Enero	70
6	16,96	25-Enero	70
Promedio	19,56	-	-

Tabla 3.5: Resultados de resistencia a compresión de hormigón con fibras de PVA.

Cilindros	Resistencia $f'c$ [MPa]	Tipo de hormigón	Fecha de fabricación	Días de fraguado
1	19,33	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	47
2	19,58	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	47
3	19,88	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	53
4	18,00	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	53
5	17,74	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	53
6	17,75	Hormigón con fibras PVA	7-Julio	53
7	19,56	Hormigón común	7-Julio	53
8	20,68	Hormigón común	7-Julio	53
9	17,52	Hormigón común	7-Julio	53
Promedio	18,71	Hormigón con fibras PVA	-	-
Promedio	19,25	Hormigón común	-	-

Además, se realiza el análisis granulométrico, el cual es regido por la norma ASTM-C 136, donde estipula que el análisis granulométrico del agregado fino y grueso se realiza mediante tamices estandarizados por la norma ASTM E11.

En esta actividad, primeramente, se debe mezclar la muestra hasta que presente homogeneidad, para que sea lo más representativa posible. Luego, se extrae 500 [g] de dicha muestra y se pasa a través de los tamices estandarizados que poseen distintas aperturas. El orden de traspaso de la muestra hacia los tamices es de mayor apertura hasta menor apertura. Las dimensiones de las aperturas para dichos tamices están presentadas en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Dimensión de 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

Una vez, extraída la muestra representativa y pasada a través de los tamices, se procede a realizar el análisis granulométrico (Ver Tabla 3.7)

Tabla 3.7: Análisis granulométrico del hormigón utilizado.

Tamiz nº	Apertura [mm]	Peso [g]	Material Retenido [%]	Material 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
#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	-

3.2. Construcción de probetas

Posterior al diseño de las probetas, se procede a elaborarlos. Primero se describirá la fase de enfierradura, luego la fase de moldaje, la fase de hormigonado y finalmente la fase de reparación. Cabe recalcar que cada proceso es importante al momento de ensayar dicha probeta, ya que, puede presentar un comportamiento no previsto producto de la baja rigurosidad en cada fase. Además, todo proceso de enfierradura, moldaje y hormigonado, se realizó en el laboratorio Arturo Arias.

3.2.1. Fase de enfierradura

En esta fase, se solicitan las barras de acero $\varnothing 6$, $\varnothing 8$ y $\varnothing 12$ en el centro ferretero Yolito con destino al laboratorio Arturo Arias. Las características de las barras de acero son A63-42H y poseen un largo de 6 [m] por defecto.

Primeramente, a las barras de acero se procede a cortar de acuerdo con el plano de las probetas (Ver Figura 3.5), Luego se procede a doblar dichas barras de acero las cuales están especificadas en el plano de la probeta. Las barras dobladas deben asegurarse de que sus bordes exteriores sean a lo más 8 [cm] con tal de que se asegure 1 [cm] de recubrimiento en ambos lados para el espesor del muro.

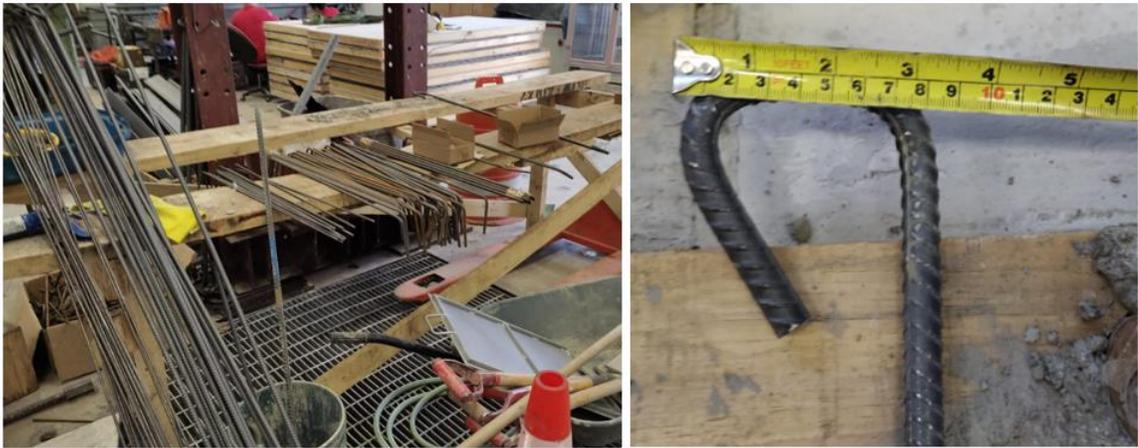


Figura 3.5: Corte (Izquierda) y doblado (Derecha) de enfierradura.

Después, se comienza a ensamblar las barras con alambre recocado N°18, para ello primero se colocan las barras longitudinales del muro de acuerdo con las medidas del plano, luego se coloca la enfierradura horizontal tanto del muro como de la fundación, las cuales deben ser en forma de J. Lo importante de este proceso, es la colocación de la armadura horizontal de la fundación y parte superior del muro ya que, deben estar bien colocados para que los tubos de PVC (50 [mm] de diámetro), puedan pasar por la enfierradura y afirmarse en el moldaje (ver Figura 3.6).



Figura 3.6: Construcción del armazón estructural.

Finalmente, con el ensamblado de ambos muros finalizados, se coloca la enfierradura en el moldaje, tal como se muestra en la Figura 3.7.

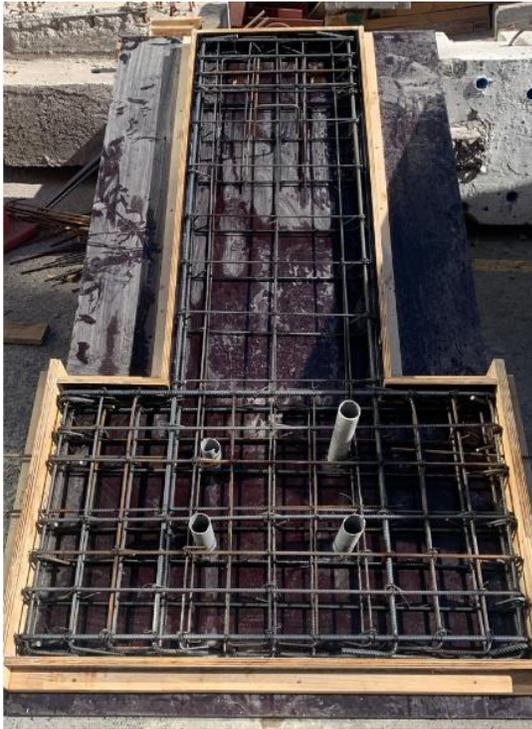


Figura 3.7: Esqueleto estructural colocado en presentado en el moldaje.

3.2.2. Fase de moldaje

Durante esta etapa, ejecutada por los estudiantes, se desarrolló un diseño de molde en AutoCAD. Este diseño es crucial ya que el proceso de vertido y fraguado del hormigón se llevará a cabo en el suelo, replicando así el procedimiento de hormigonado utilizado en la construcción de pavimentos. Para delimitar la mezcla de hormigón, se emplearon listones de madera con el mismo espesor que el muro a construir. En este contexto, se elaboró el plano correspondiente que detalla el diseño y disposición de estos elementos de contención.

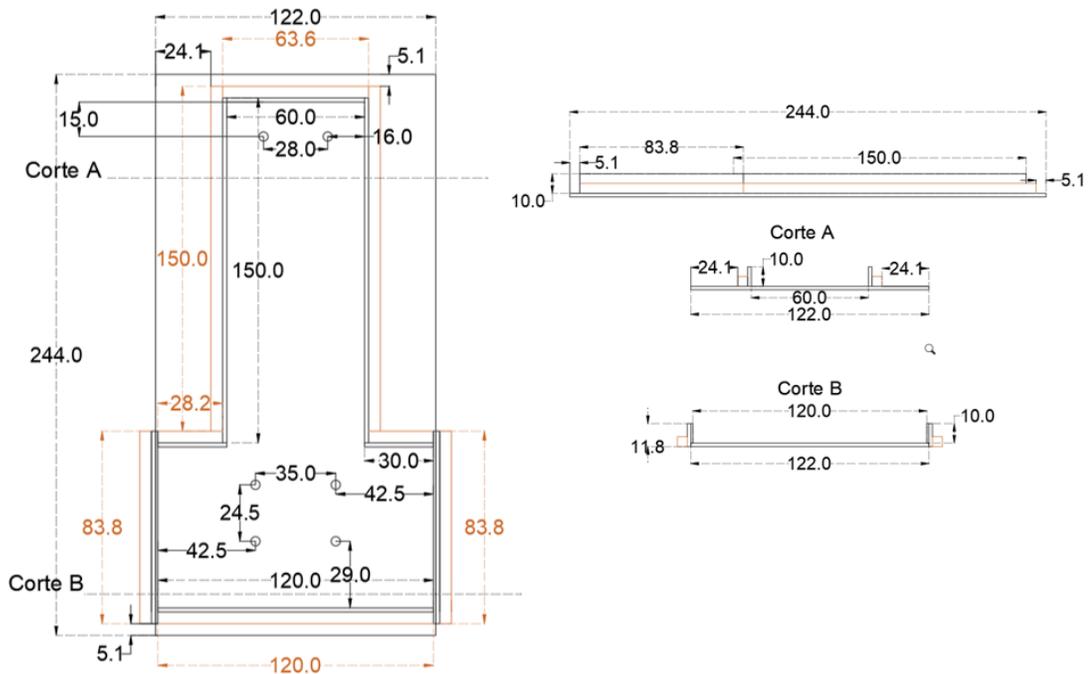


Figura 3.8: Plano de moldaje del muro.

Como se observa en la Figura 3.8, el diseño consta de un moldaje que se ubicara en el suelo donde se depositara la mezcla de hormigón, se utilizara tubos de PVC de 50 [mm] de diámetros los cuales estarán fijados por silicona impermeable y por alambre recocido que estarán sujetos en la enfierradura. La colocación de los tubos de PVC es de mucha importancia, ya que se hay un desvío en su dirección, las barras de postensado estarán desviadas, complicando el montaje experimental. A continuación, se presenta los materiales utilizados en el moldaje de la probeta y el moldaje armado.

Tabla 3.8: Materiales utilizados para el moldaje.

Material	Características	Unidades
Cave desmoldante de madera	Bidón de 5 l	1
Film moldaje	18 mm x 1.22 m x 2.44 m	3
Madera pino seco cepillado	2 in x 2 in x 3.2 m	8
Terciado mueblería	9 mm x 1.20 m x 2.40 m	1
Tornillos muro	2 ½ in	144
Tornillos fundación	2 ¾ in	144
Silicona	Impermeable a cualquier material	1
Hilos sinfín	hilo metálico	4



Figura 3.9: Moldaje de muro previo al hormigonado.

Como se muestra en la tabla de Tabla 3.8, se necesita un terciado de 9 [mm] de espesor dado que el ancho de la fundación del muro es de 120 [cm] por lo que, resta 10 [mm] por extremo dado las dimensiones de la plancha de moldaje. Luego una vez terminado el moldaje, este debe pintarse con desmoldante al interior de la probeta para desmoldar de forma idónea la probeta y sellar las esquinas y bordes inferiores del interior de la probeta con silicona. Después, se nivela la superficie en la que está apoyada el moldaje con el fin de que el hormigón no rebalse hacia una dirección al momento de asentarse. Posteriormente, se realizan 2 perforaciones en cada lado de la fundación del moldaje, para colocar los ganchos de anclaje que servirán de sujetador para levantar la probeta por el puente de grúa. Finalmente, se coloca los 4 hilos sin fin al interior de la probeta y dos listones de madera con la finalidad de fijar los tubos de PVC y evitar cualquier movimiento brusco que se genere por personas o por la mezcla de hormigón mismo.

3.2.3. Fase de hormigonado

Para esta fase, se solicita y prepara la betonera del laboratorio del IDIEM, se alistan los cilindros y se corrobora una vez más que el moldaje este nivelado y la enfierradura bien colocada (presente 1 cm de recubrimiento), previo al hormigonado.

Para el proceso de hormigonado, se describirán los materiales a utilizar. Primeramente, el hormigón utilizado es un hormigón preparado H-30 cuya marca es BEMEZCLA, este hormigón posee un tamaño máximo nominal de árido de 8 [mm], con un nivel de confianza del 90%, su resistencia a los 28 días es mayor a 300 [kgf/cm²], su agua de amasado es de 2,75 a 3 [l] y su tiempo de trabajo es de 1 hora, por lo tanto, el trabajo debe ser rápido pero cuidadoso al momento de depositarlo. Posteriormente, la fibra de PVA que se utiliza presenta las siguientes características.

Tabla 3.9: Propiedades de la fibra de PVA a utilizar.

Largo [mm]	Diámetro [mm]	Resistencia a tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Densidad [kg/m ³]
30	0.66	820	12.7	1190

Luego, en la betonera, se realizan los procesos de mezcla (tanda) y las dosificaciones de acuerdo con la ficha técnica del hormigón premezclado, donde, para cada saco de hormigón se utilizaron 3 [l] de agua. A continuación, se muestra las cantidades utilizadas para ambas probetas.

Tabla 3.10: Cantidad de material utilizado en los muros de hormigón normal y hormigón con fibras de PVA.

Probeta	N° Procesos de mezcla	Sacos de hormigón preparado	Peso hormigón (kg)	Peso de agua (kg)	Peso de fibra PVA (kg)	Cuántía de fibra de PVA en mezcla (%)
Hormigón normal	2	10	250	30	-	-
		8	200	24	-	-
Hormigón con fibras de PVA	3	6	150	18	1.53	1.81
		6	150	19	1.53	1.80
		6	150	18	-	-

El proceso de mezclado para el hormigón con fibra que se realizó es el siguiente: Primero, se mezcla el agua con los sacos de hormigón donde se deposita un 60% del agua en la betonera, para que se mezcle paulatinamente al agregado, después de observar que la mezcla está compactándose de buena forma, se deposita el resto del agua para completar la unión de los agregados. Segundo, para el caso de las fibras PVA, estas se depositan en la betonera paulatinamente mientras la betonera sigue mezclando (Ver Figura 3.10) hasta que la mezcla este homogénea para el depósito en la probeta. El porcentaje de fibras de PVA usado para este proyecto se estimó de acuerdo con el peso de las fibras con respecto al peso total (peso fibras + peso de hormigón), donde el cálculo se realiza por saco de hormigón, cuyo peso es de 25 [kg] y el peso de las fibras utilizadas es de 1.53 [kg], el cual se divide por los 6 sacos utilizados por tanda.

Con estos datos y adicionando sus respectivas densidades, se calcula dicho porcentaje utilizado para el presente trabajo de tesis.



Figura 3.10: Fibra de PVA larga (izquierda) y depósito de Fibras PVA en betonera(derecha).

Durante el proceso de mezclado para la probeta de hormigón normal, se observa que la mezcla no presentaba buena trabajabilidad ni homogeneidad en el primer proceso, por lo tanto, se decide realizar 3 procesos de mezcla para la probeta de hormigón con fibras de PVA, con la finalidad de que la mezcla sea similar en las tandas. Con respecto al peso de agua, este se aumenta en 1 [lt] (Ver Tabla 3.10) para la mezcla de hormigón con fibras, debido que, en el primer proceso, no presento una trabajabilidad adecuada, producto que, al distribuirlo con el vibrador, la mezcla no lograba llegar a los lugares importantes como las esquinas.

Posteriormente, se deposita la mezcla, desde la parte superior de la probeta (lugar de viga de transferencia) hasta la fundación del muro mientras se realiza el hormigonado de las probetas cilíndricas. Para la probeta de hormigón normal, se utilizó pequeñas barras de acero y martillos de goma para distribuir la mezcla en la probeta y expulsar el aire al interior, mientras que en la segunda probeta se utilizó un vibrador, para acelerar el trabajo y obtener una distribución adecuada. Cabe recalcar que la utilización del vibrador no debe excederse en un lugar durante un tiempo prolongado, ya que, el líquido aflora en la superficie, produciendo una mala distribución de agua, cemento y áridos, además, para ambas probetas no se utilizó plastificante como aditivo.

Finalmente, se realiza el proceso de enrasado de la superficie del hormigón con una regleta metálica, con el objetivo de quedar completamente lisa a superficie expuesta y nivelada para su uso (Ver Figura 3.11). Con respecto a la cuantía determinada para las fibras de PVA, se determinó el uso del 2% dado que, en ensayos a compresión, tracción y flexión para dos mezclas distintas de hormigón (árido fino y árido grueso) realizados en el trabajo de Marcela Herrera (2022), indicaron un aumento significativo en la ductilidad en comparación a otras cuantías y por consiguiente al hormigón común.



Figura 3.11: Enrasado final en superficie de la probeta.

Sin embargo, para facilitar el proceso de enrasado, se determina utilizar tapas de PVC (50 [mm] de diámetro), las cuales deben estar al nivel del listón de madera y no colocar los hilos sinfín hasta que el proceso de curado este completado y se realice la perforación posterior al término del curado. La perforación no debe ser mayor al espesor del muro, para que no se genere complicaciones en el análisis por fotogrametría. De esta manera, se realiza una mayor rapidez y comodidad a los trabajadores de realizar la actividad de manera adecuada y cuidadosa (Ver Figura 3.12).



Figura 3.12: Nuevo método de enrasado de la probeta.

3.2.4. Fase de reparación

Debido a no tener disponibilidad del vibrador para la probeta de hormigón normal, al retirar moldaje, esta presenta nidos debido a la mala distribución de la mezcla en el moldaje (Ver Figura 3.13). Por lo tanto, se utiliza SIKAREp (Mortero para reparación estructural de hormigón), para rellenar los nidos de la probeta, y pasados los 3 días de secado desbastar la zona reparada con el propósito distribuir la carga de postensado en la cara de la fundación del muro y en la zona superior del muro, donde se postensan las vigas de transferencia.



Figura 3.13: Lugares de reparación para probeta de hormigón normal.

Capítulo 4

Montaje experimental

Para el presente capítulo, se describirán el laboratorio a utilizar, los pasos a realizar para el montaje experimental y la instrumentación utilizada como también los softwares.

Las pruebas del ensayo a realizar se llevan a cabo en el laboratorio de estructuras “Arturo Arias” del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Dicho laboratorio cuenta con un muro y una losa de hormigón armado, las cuales poseen orificios que están separados a 40 [cm], para permitir la distribución de los instrumentos y probetas. Las dimensiones del muro son 3.95 [m] de ancho, 3.7 [m] de altura y 1.4 [m] de espesor, mientras, la losa tiene un área de 180 [m²] aproximadamente y 70 [cm] de espesor. En ambas estructuras resisten cargas máximas de 100 [tonf]. Además, al interior del laboratorio hay un puente de grúa Kixio (Ver Figura 4.1) el cual sostiene hasta cargas de 10 [ton] como máximo y un marco de acero con un tecele manual que levanta hasta 5 [ton].

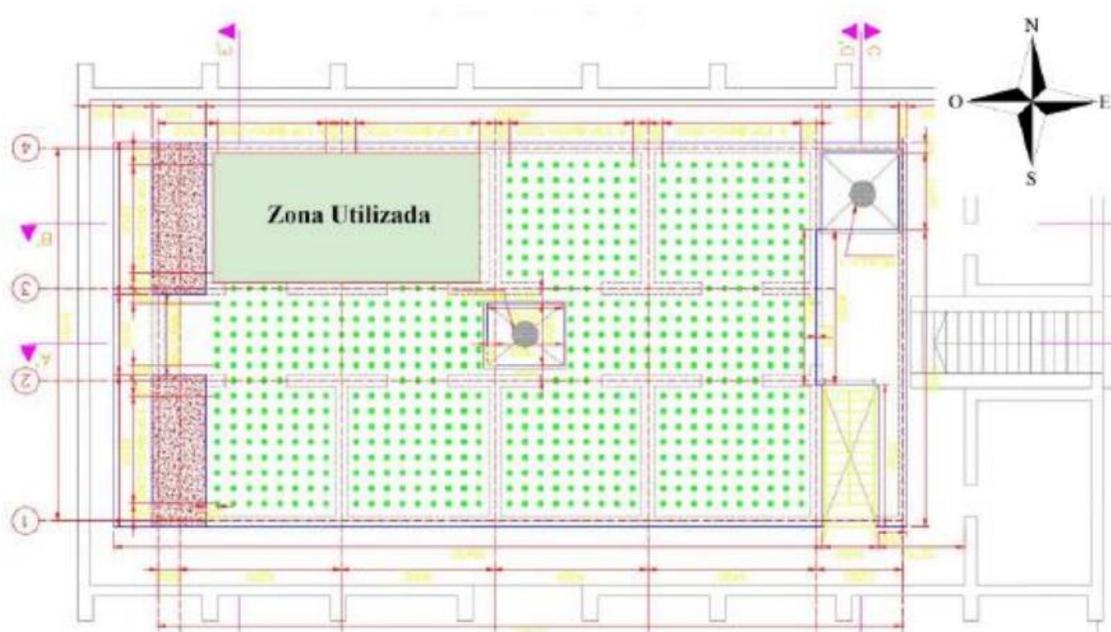


Figura 4.1: Plano en planta del laboratorio de estructuras "Arturo Arias".



Figura 4.2: Muro de reacción(izquierda) y losa(derecha) del laboratorio.



Figura 4.3: Puente de grúa Kixio del laboratorio de estructuras.

Cuando se cumplen 28 días de curado, se verifica que las superficies de las probetas sean lisas, además tanto del muro como losa del laboratorio debe realizarse de la misma forma, con tal de que las cargas de postensado y del actuador no afecten al montaje experimental. También, se debe limpiar los orificios para que puedan colocarse de buena manera las barras de acero.

En la Figura 4.4, se muestra el montaje de las fundaciones, probetas del muro y vigas de transferencia, además de los instrumentos a utilizar.



Figura 4.4: Montaje experimental.

Como se muestra en la Figura 4.4, este ensayo presenta la particularidad de presentar un muro que es apretado por dos elementos estructurales, los cuales son las fundaciones y vigas de transferencia. Este diseño de montaje busca una mayor ecología con respecto al uso del hormigón ya que al ensayar muros con espesores de fundaciones y vigas de transferencias mayores al muro, la probeta completa se desecha en un relleno sanitario, en cambio con este método de fundaciones reutilizables y postensadas, se busca reciclar estos elementos estructurales, para obtener un mayor rendimiento de utilización de material.

A continuación, se describirán los instrumentos a utilizar en el montaje experimental.

4.1.1. Actuador horizontal

El actuador horizontal es un dispositivo que controla el movimiento en una dirección con un sistema de carga. Además, realiza mecanismos de extensión y compresión, los cuales, son transmitidos hacia rotulas de conexión (Ver Figura 4.5) para permitir que la carga sea transmitida en el techo del muro (viga de transferencia). Su capacidad máxima de carga es de 100 [tonf], sin embargo, para este proyecto se realizará cargas que fluctuaran en las 10 [tonf].



Figura 4.5: Actuador horizontal.

Su rango de desplazamiento máximo es de 47 [cm], donde en tracción alcanza un estiramiento de 60 [cm], mientras que en compresión tiene 13 [cm]. Ante estas características, tanto el actuador como el muro deben estar posicionados de forma estratégica para que el rango del actuador tanto en tracción como en compresión sean iguales, para ello se utilizan placas de acero cuadradas con un espesor de 5 [cm], que realizan la función de alejar el actuador del muro de reacción (Ver Figura 4.6).



Figura 4.6: Rotulas de conexión del actuador horizontal.

A medida que se coloca el actuador, primero se coloca las rotulas de conexión, donde la rótula de conexión negra (Ver Figura 4.6), estará en el muro del laboratorio mediante barras de acero Dywidag con un diámetro de 32 [mm], donde son apernadas ante un apoyo rotulado. Luego, para la rótula de conexión azul, se realiza una conexión rotulada donde las barras de acero Dywidag poseen un diámetro de 20 [mm].

El proceso de carga del actuador horizontal se realiza mediante una bomba hidráulica (Ver Figura 4.7), donde se debe regular la presión del aceite de acuerdo con los desplazamientos solicitados que realizara el instrumento, ya que su finalidad es mover el pistón del actuador. El registro de la medición de carga es producido por una celda de carga Interface y modelo 1200HC.1244 de capacidad de 1200 [KN], cuya ubicación esta entre el embolo del actuador, el cual realiza el movimiento con la rótula conectada a la probeta a ensayar.



Figura 4.7: Bomba hidráulica del actuador horizontal.

Con respecto al desplazamiento estándar impuesto al actuador horizontal, se utiliza la norma ACI374.1 con el fin de estandarizar el ensayo y comparar con proyectos internacionales relacionados al tema. El protocolo constituye en desplazamientos cíclicos pseudo-estáticos donde contiene al menos 2 derivas de techo en el rango lineal del sistema de ensayo y aumentaran hasta llegar al fallo global de la probeta. Los desplazamientos de la probeta se calculan de acuerdo con la distancia entre la base del muro y el punto medio de la viga de transferencia, la cual es de 1.3 [m] por diseño. Al inicio del ensayo, se decide ir en dirección hacia el Este (tracción del actuador horizontal), por lo tanto, esta dirección de partida se mantiene para el ensayo de la siguiente probeta.

En la Tabla 4.1, se muestra los desplazamientos de cada porcentaje de la deriva de techo en cada ciclo, donde dicho ciclo se deberá repetir 3 veces por cada porcentaje.

Tabla 4.1: Protocolo de carga nominal.

Drift [%]	Desplazamiento [mm]
0.050	0.65
0.10	1.30
0.15	1.95
0.20	2.60
0.30	3.90
0.40	5.20
0.50	6.50
0.75	9.75
1.00	13.00
1.25	16.25
1.60	20.80
2.00	26.00
2.50	32.50
3.20	41.60
4.00	52.00
5.00	65.00

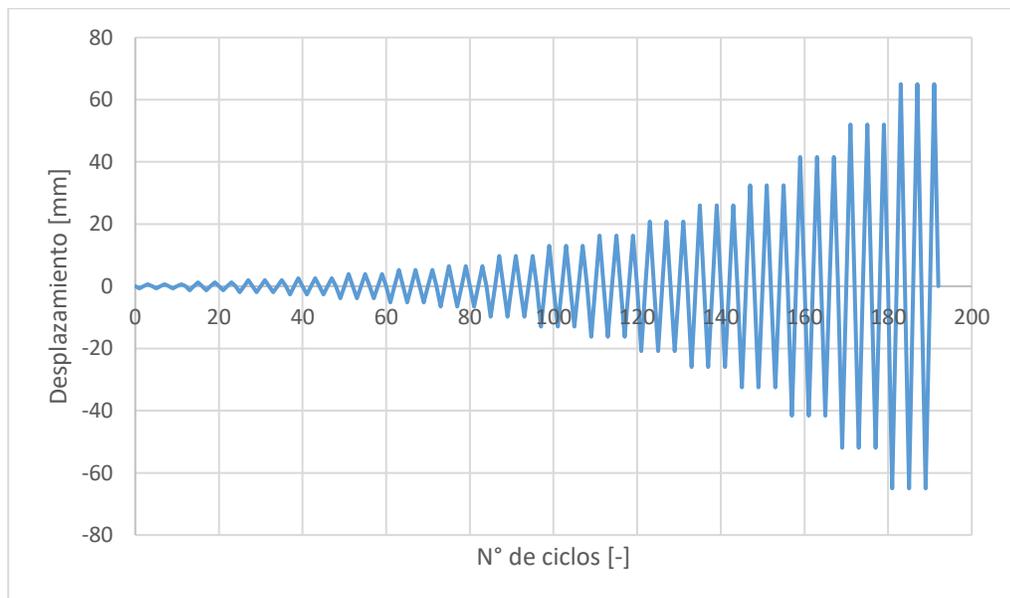


Figura 4.8: Protocolo de ensayo.

Aunque se obtengan dichos desplazamientos por medio del diseño, los valores pueden cambiar dada las condiciones del montaje experimental.

4.1.2. Gatos hidráulicos

Para este ensayo, se utilizan gatos hidráulicos para el postensado y carga axial, la cual son controlados por una bomba hidráulica con un panel táctil. Estos instrumentos realizan la tensión de la barra de acero al interior de ellos, donde la tensión es regulada por medio de una celda que se coloca apernada entre uno de los gatos hidráulicos y una placa de acero (ver Figura 4.9). La celda registra en todo momento la carga que ejerce el gato hidráulico, enviando la información al panel táctil del equipo. La cantidad máxima en simultaneo que permite la bomba hidráulica es de 4 unidades, presentando un mayor control de la carga (menor fluctuación del valor de la carga durante el tiempo activado). Se recomienda para el postensado y carga axial utilizar los 4 gatos hidráulicos por lo mencionado anteriormente.



Figura 4.9: Gatos hidráulicos.

A continuación, se detallarán las actividades para el montaje experimental.

4.1.3. Postensado de barras de acero

Como se mencionó anteriormente, el ensayo trata de un muro que es apretado y fijado a la losa por elementos estructurales, por lo tanto, se debe realizar el postensado en determinadas direcciones, de tal manera, que el conjunto de los elementos esté bien fijado y al momento de realizar el ensayo, se efectuó la fricción entre la probeta del muro y las fundaciones. Ante esto, primero se colocan en la posición estipulada las fundaciones separadas a una distancia levemente mayor al espesor de la probeta. Luego de colocar la probeta entre las fundaciones, se realiza el postensado transversal, utilizando 4 barras de acero Dywidag cuyo diámetro es de 32 [mm] (Ver Figura 4.10). La carga por barra de acero de acuerdo con el diseño del montaje experimental es de 20 [tonf], el cual se realizó en dos rondas de postensado de 10 [tonf], con la finalidad aproximarlo paulatinamente a la probeta y de esta forma, evitar daños en las fundaciones y en la

probeta. Debido a este sistema de postensado transversal, gran parte de la barra de acero queda expuesta al terminar dicho proceso, por lo que se recomienda cuidado al colocar la instrumentación en el muro.



Figura 4.10: Postensado de barras de acero transversales a las fundaciones.

Una vez finalizado, el postensado transversal, se procede a fijar el sistema completo a la losa del laboratorio para evitar rotaciones que pueda generar las fundaciones durante el ensayo, no obstante, antes de colocar el sistema de postensado a la losa, se instala una placa de acero cuyas dimensiones son 200[mm] de ancho, 600 [mm] de largo y 10 [mm] de espesor. De esta manera la probeta del muro evita rotar con respecto a las fundaciones. Ya colocada la placa, se emplea el sistema de postensado (Ver Figura 4.11), donde la carga por barra de acero es de 15 [tonf]. Las barras utilizadas para este postensado son Dywidag, cuyo diámetro es de 32 [mm]. El proceso de postensado para fijar el sistema a la losa, debe ser análogo al proceso de postensado transversal, es decir, el postensado cruzado, con la finalidad de acomodar el sistema paulatinamente a la losa.



Figura 4.11: Postensado de barras de acero ancladas a losa del laboratorio.

Luego se realiza el postensado transversal, ubicado en la viga de transferencia. En esta parte, se utilizan dos barras de acero Dywidag 32 [mm] y la carga impuesta por barra es de 10 [tonf]. En este postensado, primeramente, se coloca una placa de acero con forma L (Ver Figura 4.12). Esta placa de acero tiene la finalidad de mantener el sistema de carga axial fijado a la probeta apertando cuatro tornillos de acero de 15 [mm] de diámetro (2 en lado Norte y 2 en lado Sur). Una vez hecho esto, se utilizan placas cuadradas pequeñas para el postensado transversal en la viga de transferencia (Ver Figura 4.13), ya que al realizar ensayos cíclicos con arriestramiento lateral, si se utiliza placas de acero normales del laboratorio, debido a las cotas del arriestramiento, las barras pueden tocar con dicha placa de postensado y generar una torsión en el muro.



Figura 4.12: Postensado de barras de acero transversales a viga de transferencia.



Figura 4.13: Placas de postensado en viga de transferencia, placa normal(izquierda) y placa modificada(derecha).

Después de realizar los tres procesos de postensados, se colocan las cuñas de corte en ambos lados para las 2 fundaciones (elementos estructurales). De esta manera se trata de evitar el deslizamiento horizontal cuando se realice el ensayo.

4.1.4. Sistema de carga axial

Tal como se muestra en la Figura 4.14, el sistema de carga axial, el cual simula la carga axial constante en un muro de edificación típico chileno, consiste inicialmente en colocar una plancha de acero de 60 [cm] de largo, 40 [cm] de ancho y 1 [cm] de espesor, con el propósito de distribuir completamente la carga en la cara superior del sistema, la cual debe estar lisa y nivelada. En caso de no estar nivelada y/o lisa la superficie producto de la colocación de las vigas de transferencia o de las placas de acero L, se recomienda usar una capa de yeso con un espesor recomendado de 2-3 [cm] en la cara superior del sistema. La decisión de utilizar yeso permite una rapidez en la instalación del sistema de carga axial y el proceso de desmontaje de esta, ya que, si se usa un material más resistente, puede generar daños en las vigas de transferencias o en la parte superior de la probeta al momento de retirarlas posterior al ensayo. La carga de compresión de la probeta se simula mediante 2 barras de acero Dywidag® de 32 [mm], las cuales son traccionadas por los gatos hidráulicos con una carga de 8 [tonf] para cada una. Esta tracción de la barra se sostiene desde los gatos hidráulicos hasta la base inferior de las fundaciones, donde dicha carga se transmite mediante los perfiles de acero y la plancha de acero mencionada anteriormente. Durante el ensayo, la tracción de cada barra de acero debe ser constante y monitoreada, dado que puede generar resultados no idóneos.



Figura 4.14: Sistema de carga axial.

El valor de la carga axial producida sobre el muro se calcula mediante el 10% de la resistencia máxima nominal del hormigón y el área transversal nominal ($0.1 \cdot f'_c \cdot A_g$). Una vez colocado el sistema de carga axial, durante el ensayo, el valor para cada barra lo indica el panel táctil de la bomba hidráulica, sin embargo, este valor fluctúa, por lo que la carga axial aumenta y disminuye levemente, ante esto, se decidió utilizar 4 gatos hidráulicos, donde los 2 restantes se ubican en la losa del laboratorio, alejados del montaje experimental para obtener un mayor control de la carga. En la Tabla 4.2 se muestra la carga axial nominal y la que se utilizó en el ensayo.

Tabla 4.2: Carga axial impuesta en el muro.

Carga axial [tonf]		Carga por barra [tonf]	
Nominal	Real	Nominal	Real
15	16	7.5	8

4.1.5. Marco de acero y restricción lateral

Manríquez y Díaz, 2016, diseñaron y realizaron la construcción de un sistema de restricción lateral para muro con la finalidad de evitar el movimiento fuera del plano de un muro. El marco de acero está compuesto por cuatro barras que se conectan a dos placas de acero, las cuales están unidas al sistema de carga axial. Esto se logra mediante un soporte deslizante que incorpora una punta de barra redondeada (Ver Figura 4.15). Las barras se unen al marco de acero mediante dos puntales al Norte y dos al Sur. La altura de los puntales puede ajustarse en función de la altura de la probeta a ensayar.

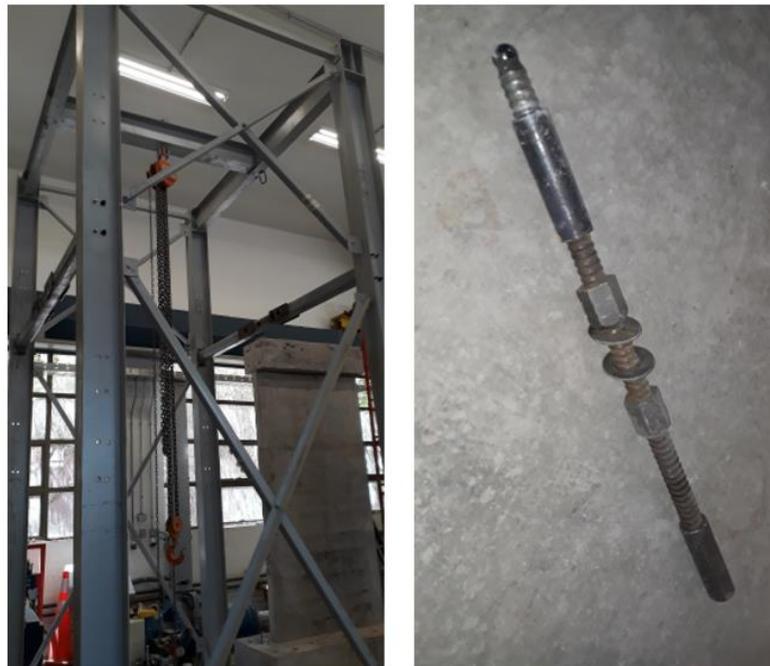


Figura 4.15: Marco de acero (izquierda) y puntales (derecha).

En la zona superior del marco de acero, se encuentra un tecle el cual tiene una capacidad máxima de 5 [ton]. Durante el ensayo, el tecle se utiliza para sostener el sistema de carga axial, cuando la probeta se fracture completamente, por lo tanto, es una medida de seguridad importante para resguardar la vida de las personas al interior del laboratorio. En la Figura 4.16, se muestra las cuñas del marco de acero, cuya función es restringir el movimiento del marco cuando se desarrolle el ensayo, los cuales se fijan en la losa del laboratorio.



Figura 4.16: Cuñas de anclaje a losa del marco de acero.

Finalmente, con estas actividades realizadas, se coloca el actuador a las rotulas de conexión que se encuentran en el muro del laboratorio y en la probeta (Ver Figura 4.17).

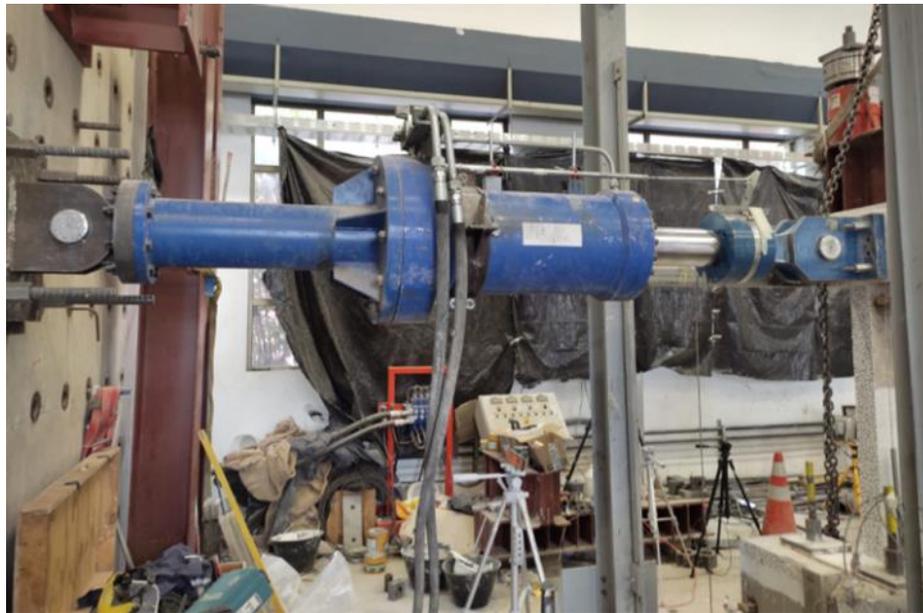


Figura 4.17: Colocación del actuador horizontal.

4.1.6. Instrumentación

Con el propósito de estudiar el comportamiento global de cada muro, se utilizan los sensores LVDT y fotogrametría para la medición de los desplazamientos del muro, lo que permite la elaboración de las curvas Capacidad vs deriva, observar si se presentan desplazamientos fuera del plano, entre otras. Dichos resultados serán mostrados en el siguiente capítulo.

4.1.6.1. Transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT)

Los sensores LVDT (Linear Variable Differential Transformer) están formados por un cuerpo cilíndrico hueco y un núcleo (o core). Dicho sensor realiza el registro cuando el núcleo se mueve al interior hueco del cuerpo cilíndrico, obteniendo un diferencial de voltaje, donde se obtiene el desplazamiento en [mm] mediante su factor de escala. Cada sensor presenta distintas características, tales como la longitud disponible de recorrido del sensor al interior, su factor de escala y los límites de voltaje en ellas. Para los ensayos, se utilizan sensores LVDT bipolar Macrosensors® DC 750, los cuales miden un rango de -10 [V] a 10 [V], donde su rango de recorrido del núcleo al interior del sensor varía entre 1 a 20 pulgadas. De acuerdo con el movimiento esperado en cada sector de la probeta, se colocan los sensores claves en dichas zonas.

Para medir los desplazamientos laterales desde un sistema independiente, se utiliza un pedestal de acero, el cual se ancla a la losa mediante barras de acero $\varnothing 32$. Con respecto a los soportes de los sensores de desplazamiento horizontal, estos son puestos en el pedestal, siendo apretados mediante tuercas. (Ver Figura 4.18)



Figura 4.18: Pedestal independiente para los sensores externos a la probeta(izquierda) y el soporte de los sensores en el pedestal(derecha).

Los desplazamientos que describen la deriva de techo y posteriores correcciones se detallan a continuación:

- **LVDT ROT. Izquierdo:** Su ubicación está en el lado Oeste de la fundación del muro. Este sensor mide el levantamiento y aplastamiento que se genera en dicho lado de la fundación. Se espera que la fundación se levante cuando el actuador se desplace en dirección Este. El sensor utilizado, debido a la posible fricción entre el muro con las fundaciones, debe ser al menos de 2 pulgadas.
- **LVDT ROT. Derecho:** Su ubicación está en el lado Este de la fundación del muro. Al igual que LVDT anterior, este sensor mide el levantamiento que se genera en dicho lado de la fundación. Se espera que la fundación se levante cuando el actuador se desplace en dirección Oeste.
- **LVDT Inferior:** Este sensor se ubica en la zona inferior del pedestal azul. Dicho sensor mide el desplazamiento horizontal de la fundación del muro ante una carga cíclica. Debido a la ubicación del pedestal azul con respecto a la fundación del muro, se utiliza un LVDT de 20 pulgadas.
- **LVDT Superior:** Este sensor se ubica en la zona superior del pedestal azul, específicamente, a la altura del punto medio de la viga de transferencia(2[m] desde la losa). Además, mide el desplazamiento horizontal en altura del muro durante el ensayo (desplazamiento de techo). El LVDT a utilizar dado que se encuentra en el pedestal y en lado contrario al actuador horizontal es de 20 pulgadas.
- **LVDT Actuador:** Corresponde a un sensor ubicado sobre el actuador horizontal, el cual mide el desplazamiento del pistón de dicho actuador. Por lo tanto, no considera las deformaciones elásticas que experimentan las barras de sujeción de las rotulas durante el ensayo, por lo que solamente se aprovecha como un control secundario de la deriva de techo. El largo del sensor, al igual que el anterior, es de 20 pulgadas.

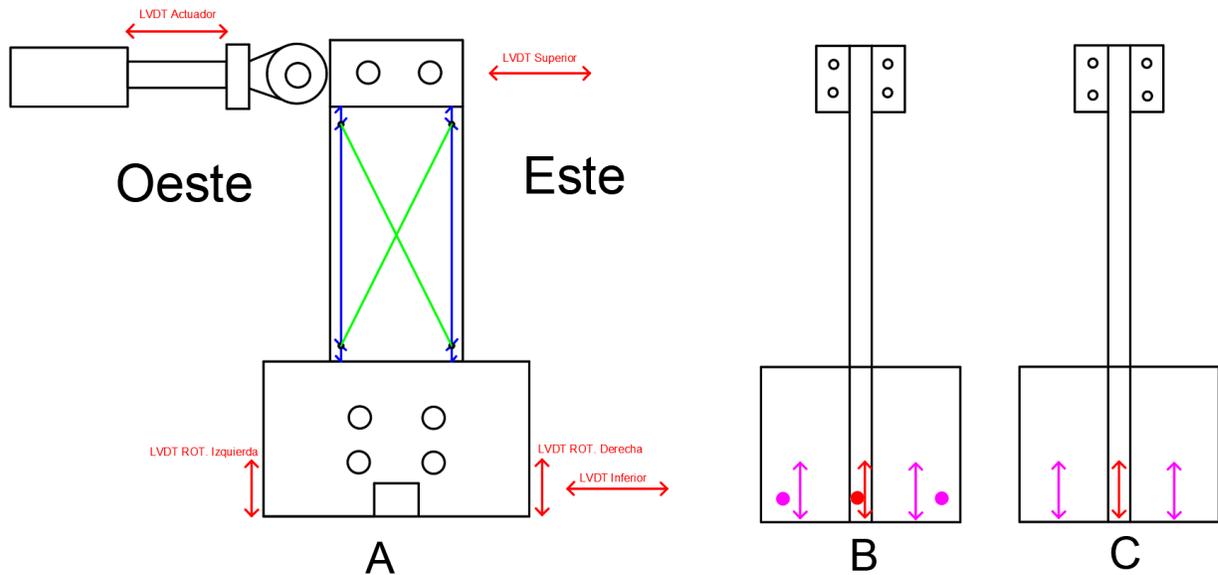


Figura 4.19: Esquema de ubicación para los LVDT's del muro. Vista Sur(A), Viste Este(B) y Vista Oeste(C).

En la Figura 4.19 se indica la ubicación de cada sensor en la probeta del muro, donde cada sensor LVDT se conecta a la caja de conexión de acuerdo con su canal correspondiente.

Además de estos sensores, a los que se les denomina “críticos” (Color Rojo), debido a su relevancia en la corrección del registro del sensor superior, se colocan sensores en el muro (color Azul y Verde), para calcular las deformaciones por corte y flexión, como también, se colocan sensores en las fundaciones (Color Rosado) para medir su rotación y desplazamiento horizontal.

4.1.6.2. Sistema de adquisición de datos

En el trabajo de Muñoz, 2018, construyó una caja donde se conectan los cables de los sensores de LVDT que se ubican en la probeta. Esta caja presenta 32 canales disponibles DB9 y una salida DB37, el cual lleva las señales a un módulo del sistema de adquisición de datos y tres entradas de voltaje (positivo, negativo y neutro), los cuales se conectan a una fuente de alimentación RIGOL (modelo DP832), con una alimentación de ± 15 [V]. Después, en dicha caja de conexión, se enlazan los 5 sensores LVDT's críticos y los sensores LVDT's no críticos.



Figura 4.20: Caja de conexión (izquierda) y fuente de alimentación (derecha).

Luego, para la adquisición de datos se utiliza el chasis modelo NI cDAQ-9188XT (National Instruments[®]) y los módulos de lectura de datos modelo NI9205 (lectura de voltaje) y NI9237 (lectura de celda de carga). La caja de conexión de LVDT se conecta al módulo NI9025 por medio de una extensión DB378. El chasis es conectado a una fuente específica modelo NIPS-15 para ser energizado y la celda de carga del actuador se enlaza al canal Ch4 del módulo NI9237.



Figura 4.21: Chasis, modulo Adquisición de datos y fuente de poder.

Las señales son transferidas al computador principal a través de un conector RJ45. Luego el computador utiliza el software LabVIEW[®] para procesar las señales mediante un VI programado para las condiciones específicas de este set de ensayos. La interfaz 65 del software permite la lectura en tiempo real de las 7 señales utilizadas durante cada ensayo (5 LVDT's y 2 celdas de carga) y las almacena en un archivo de texto.

4.1.6.3. Fotogrametría

El proceso de la fotogrametría consta en ubicar los trípodes con sus cámaras en lugares estratégicos para el analizar el daño de la probeta por medio de la información visual. Dicha información se obtiene mediante fotografías semiautomáticas. Para lograr la sincronización de todas las cámaras, se procede a utilizar el software DSLR Remote Pro Multi-Camera[®]. Este programa permite controlar la toma de fotografías de las cámaras DSLR de forma remota y se asegura que todas las fotografías se sincronicen al mismo tiempo al momento de realizarlas. Gracias a esto, se monitorea de forma periódica el daño de la probeta a medida que se desarrolla el ensayo, donde dicha información se complementara con lo registrado por los sensores LVDT.

Para realizar un correcto análisis de evaluación de daños en el muro, se debe pintar el muro con pintura cal, dicho proceso debe ser con 2 o 3 manos, ya que, si sobrepasa este número, la superficie pintada se comportaría de forma elástica afectando en el análisis de las grietas. Posteriormente se pinta una grilla de puntos negros distintos en toda la superficie de diferentes tamaños, de tal manera que haya una densidad de puntos notoria en el área de análisis. (Ver Figura 4.22)

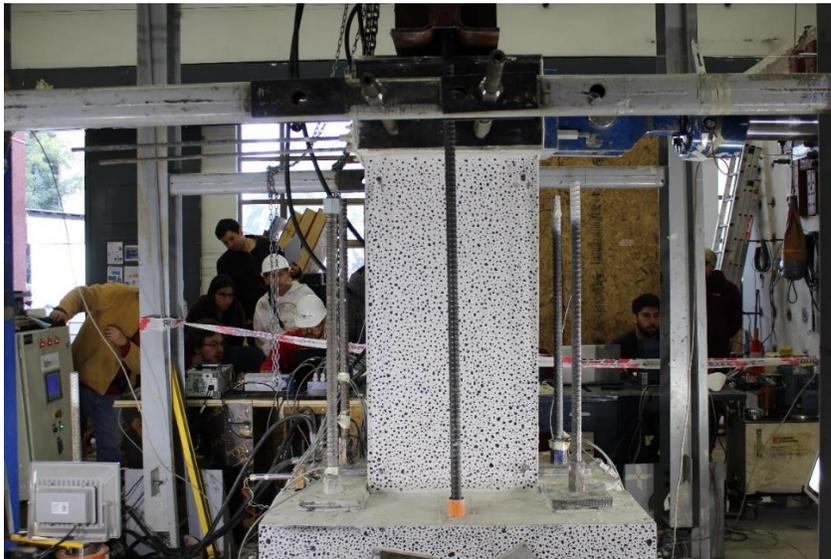


Figura 4.22: Superficie pintada de grillas de puntos negros ante una superficie blanca para fotogrametría.

En ambos ensayos, se colocaron las cámaras en las siguientes posiciones:

- 1 cámara global para analizar el muro completo (dirección Norte a Sur)
- 2 cámaras locales para el análisis de la rótula plástica del muro en lado Este y Oeste
- 2 cámaras para analizar el pandeo fuera del plano del muro (una en lado Este y una en lado Oeste)
- 1 cámara global para analizar el muro completo (dirección Sur a Norte) que se agregó solamente en el muro de hormigón con fibras de PVA.

4.1.7. Ensayo experimental

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar el montaje experimental y posterior ensayo.

1. Posicionar las fundaciones y la probeta en el punto estratégico.
2. Postensar transversalmente las fundaciones con la fundación del muro.
3. Postensar el sistema a la losa.
4. Colocar las vigas de transferencia con la placa L y realizar el proceso de postensado en estas.
5. Colocar las cuñas de corte en las fundaciones (elementos estructurales) y yeso en la cara superior del sistema en caso de presentar desniveles para el sistema de carga axial.
6. Instalar el sistema de carga axial en el sistema.
7. Posicionar y anclar el marco de acero y ajustar el arriestramiento lateral
8. Sujetar el sistema de carga axial al tecele que está ubicado en el marco de acero por seguridad.
9. Pintar el muro con pinta cal y realizar puntos negros de diferentes tamaños y de forma aleatoria para el análisis de fotogrametría.
10. Instalar sensores de instrumentación con la calibración correspondiente.
11. Instalar cámaras fotográficas.
12. Energizar todo el sistema de instrumentación, verificando que tanto los sensores como el software funcionen correctamente.

Con las tareas enumeradas ya hechas, se procede a llevar a cabo el ensayo. En ambos muros, se realizaron dichos pasos para el montaje.

Capítulo 5

Resultados experimentales

5.1. Introducción

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para cada muro donde se analizan los modos de falla y se realiza una comparación de la evolución de las grietas durante el desarrollo del ensayo. Por consiguiente, de acuerdo con los sensores LVDT's, se lleva a cabo un minucioso análisis de los registros para observar las correcciones que se deben realizar dado por el deslizamiento y rotación de las fundaciones ante este particular montaje experimental como es el ensayo cíclico de un muro mediante el "método sándwich". Además, se analiza la curva histerética de ambos muros para observar la ductilidad y su resistencia. Se entrega una descripción de daño global de los muros durante el ensayo, enfatizando en los momentos donde falla alguna barra de acero, la formación de grietas importantes y falla total del muro, donde finalmente se realizará una comparación de ambas probetas y concluir acerca de las propiedades que otorga un hormigón con fibras de PVA como refuerzo comparado con un muro de hormigón común en muros.

Los resultados que se mostraran a continuación son comparables, debido a la geometría, el diseño de la armadura, la construcción, las condiciones ambientales y los materiales del muro, fueron similares durante el desarrollo de este proyecto. También, se desarrollaron los pasos de montaje experimental mencionados anteriormente para ambos muros de manera análoga para su posterior análisis.

A continuación, se presenta la convención de signos que se utilizó para el desarrollo de este trabajo. Donde el desplazamiento de techo al Oeste es positivo y al Este es negativo.

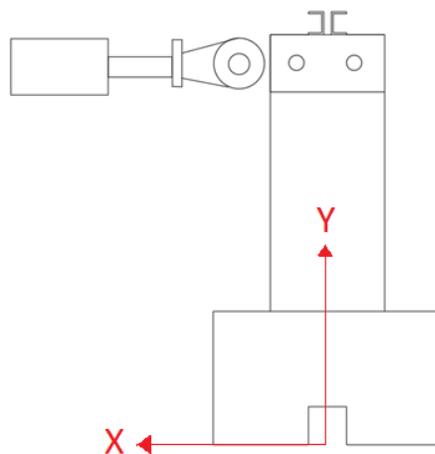


Figura 5.1: Convención de ejes positivos.

En lo que respecta al cálculo del desplazamiento corregido de la deriva de techo del muro se debe tener en cuenta el desplazamiento horizontal que genera la rotación de la fundación del muro, asumiendo dicho movimiento como un sólido rígido. Además, se debe restar el desplazamiento horizontal de la fundación del muro de acuerdo con el sentido de la carga. A continuación, se presenta la fórmula de corrección para obtener la deriva real del muro.

$$\Delta_{Correccion} = \Delta_{Superior} - \Delta_{Inferior} - \frac{(\Delta Rot_{Derecha(Este)} - \Delta Rot_{Izquierda(Oeste)})\Delta H}{\Delta L} \quad 5.1$$

Gracias a la investigación de L. Massone y J. Wallace, 2004, acerca de “Respuestas carga-deformación de muros esbeltos de hormigón armado”, se obtiene el cálculo de los desplazamientos de corte y flexión dada la Figura 5.2, donde las ecuaciones simplificadas de acuerdo con los sensores colocados en el muro son las siguientes:

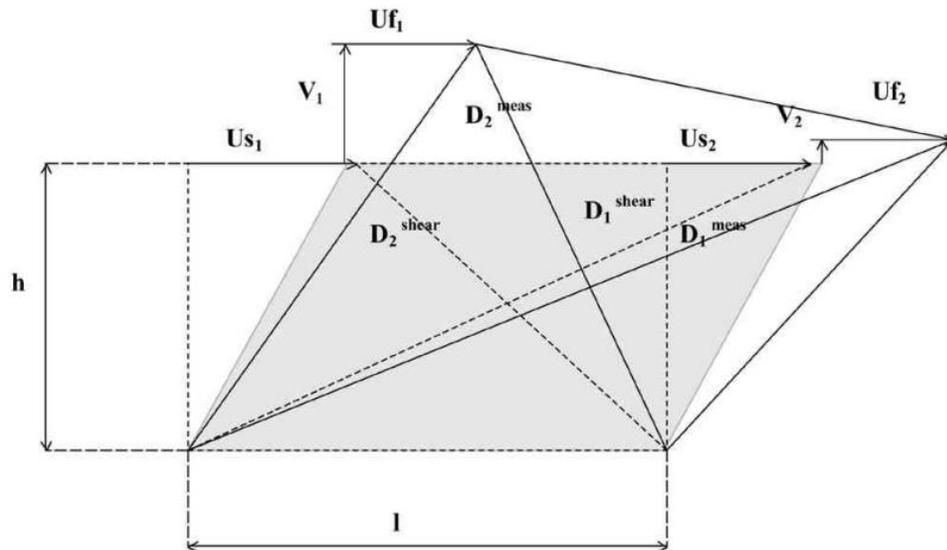


Figura 5.2: Modelo de flexión que tiene en cuenta el desplazamiento vertical. [14-Fig. 9]

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

$$\Delta Uf = \theta h$$

$$\theta = \frac{V_1 - V_2}{L}$$

Donde Diagonal 1 y 2, son desplazamientos de los sensores diagonales en [mm], D_o , es la distancia inicial de los sensores diagonales, las cuales son idénticas en [mm] y L es la distancia horizontal entre los hilos sinfín. Para el cálculo del desplazamiento de flexión, h es la distancia desde el punto medio del sensor vertical LVDT del muro hasta el sensor LVDT superior. Para el cálculo del desplazamiento a flexión, se utiliza la ecuación simplificada para los 3 niveles de

sensores LVDT's verticales, ya que se realiza una integración del ángulo de rotación θ para cada nivel de sensor vertical, donde posteriormente se suman entre ellas, obteniendo de esta manera el desplazamiento de flexión total del muro. En el caso del desplazamiento de corte se utiliza solamente la información de los sensores diagonales. Posterior al cálculo de ambos datos, se obtiene el desplazamiento total, el cual es la suma del desplazamiento de corte y flexión.

$$\Delta U_{total} = \Delta U_s + \Delta U_f \quad 5.2$$

Al iniciar el ensayo se observó que la sensibilidad de la botonera del actuador horizontal es alta ante porcentajes de derivas muy pequeños, por lo que se decidió controlar las primeras cinco derivas por desplazamiento (0.05%, 0.1%, 0.15%, 0.20%, 0.30%). Luego, a partir del 0.4% de deriva, el ensayo es controlado por desplazamiento. Cabe recalcar, que dada la ubicación del sensor superior LVDT, el valor de los desplazamientos por deriva para el muro se modificó. (Ver Tabla 5.1)

Tabla 5.1: Protocolo de carga nominal modificado.

Drift (%)	Desplazamiento [mm]
0.050	0.7
0.10	1.4
0.15	2.1
0.20	2.7
0.30	4.1
0.40	5.5
0.50	6.9
0.75	10.3
1.00	13.7
1.25	17.1
1.60	21.9
2.00	27.4
2.50	34.3
3.20	43.8
4.00	54.8
5.00	68.5

Ambos ensayos se realizaron con las mismas condiciones ambientales y de montaje dentro del laboratorio. Las diferencias tanto en daño, resistencia y desplazamientos están directamente relacionados con el hormigón premezclado utilizado y la dosificación, ya que, tanto la geometría como la armadura del muro se realizaron de forma análoga.

5.2. Respuesta global del muro de hormigón normal

Durante el ensayo se le aplicó la carga axial de 16 [tonf] distribuidas en las dos barras de acero, la cual se mantuvo monitoreando en todo momento, mediante la pantalla táctil de la bomba hidráulica. La fluctuación durante el ensayo no fue mayor a 2 [tonf] debido a la funcionalidad de los 4 gatos hidráulicos en simultáneo.

Con respecto a los desplazamientos por rotación de las fundaciones que realizaban la función de apretar y fijar la fundación del muro, estas oscilaban entre 1 [mm] al levantarse de la losa y 0.5 [mm]. Para la rotación en la fundación del muro, los valores en el lado Oeste, presentaron valores similares a los mencionados anteriormente, sin embargo, para el lado Este, presento un registro particular, donde su línea base se desviaba del “eje x”. Este registro en específico se ajustó utilizando el software MATLAB posterior al ensayo, donde sus peaks de rotación son 2 [mm] cuando se levanta de la losa y 1.5 [mm] al momento de comprimirse. Este problema del registro podría haber sido generado por no fijar bien el sensor LVDT al soporte, producto del estado de los fijadores.

El ensayo se controló principalmente por carga hasta el 0,4%, y posterior a ese porcentaje, se controló por desplazamiento, donde se observaba el desplazamiento corregido como el controlador del ensayo para el muro de hormigón normal. Este error ya mencionado de montaje se observa claramente en la Figura 5.3, donde hay una notoria asimetría.

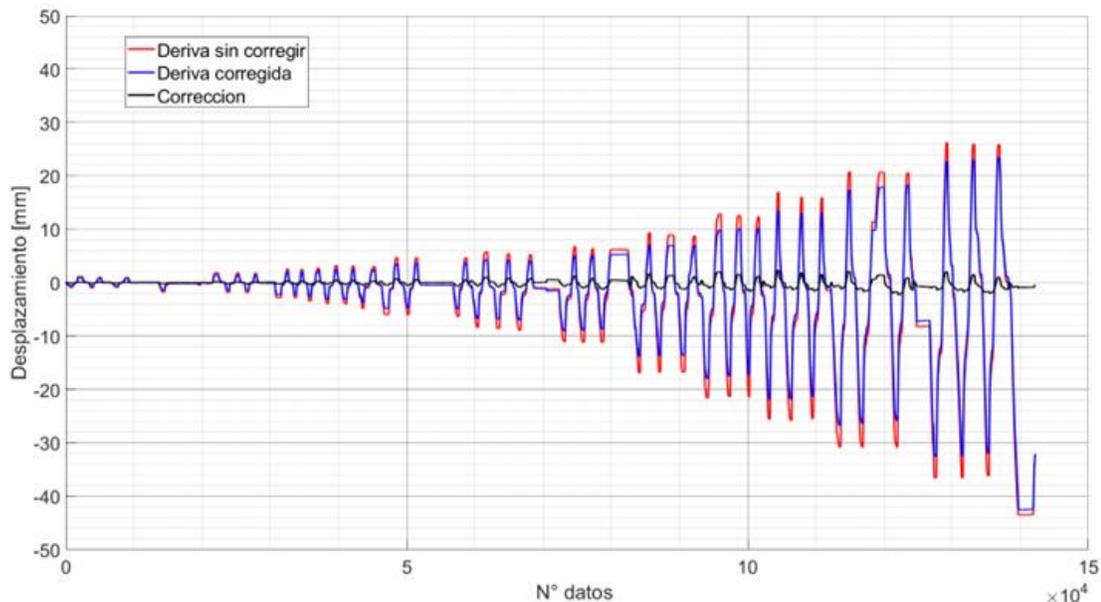


Figura 5.3: Corrección de desplazamiento de techo Muro hormigón armado.

Antes de iniciar el ensayo, sucedió un error que no se percató en la inscripción de los signos para los sensores críticos en el software LabVIEW®, los cuales son importantes para el desarrollo del ensayo, mostrando los desplazamientos y la capacidad del muro tanto reales (registros de los

sensores principalmente) como corregidas (utilizando la fórmula de corrección). Dicho error fue observado cuando se realizó el análisis de datos.

Al término del ensayo y corrección (Ecuación 5.1), se observa en la Figura 5.4, que en desplazamientos positivos (dirección Oeste), se alcanzó un desplazamiento de techo corregido de 23,41 [mm], mientras, en desplazamiento negativo (dirección Oeste) consiguió -32,54 [mm]. Además, se aprecia, la respuesta lineal del muro a los 5[mm] en dirección Este (desplazamiento negativo) y Oeste (desplazamiento positivo). La resistencia máxima del muro alcanzado fue de 10[tonf], el cual, se presentó en el desplazamiento negativo. Se completaron los tres ciclos en ambas direcciones, no obstante, cuando empieza el ciclo para el nuevo desplazamiento de techo en dirección Este, la estructura falla completamente de manera instantánea, alcanzando un desplazamiento de 42,52 [mm] y una resistencia de 2,1 [tonf], presentando una falla de tipo frágil e inestabilidad lateral, producto del sistema de carga axial. Con respecto a la degradación de la resistencia, en ambas direcciones, no presentaron degradaciones de resistencias mayores al 20%, completando los 3 ciclos de manera normal.

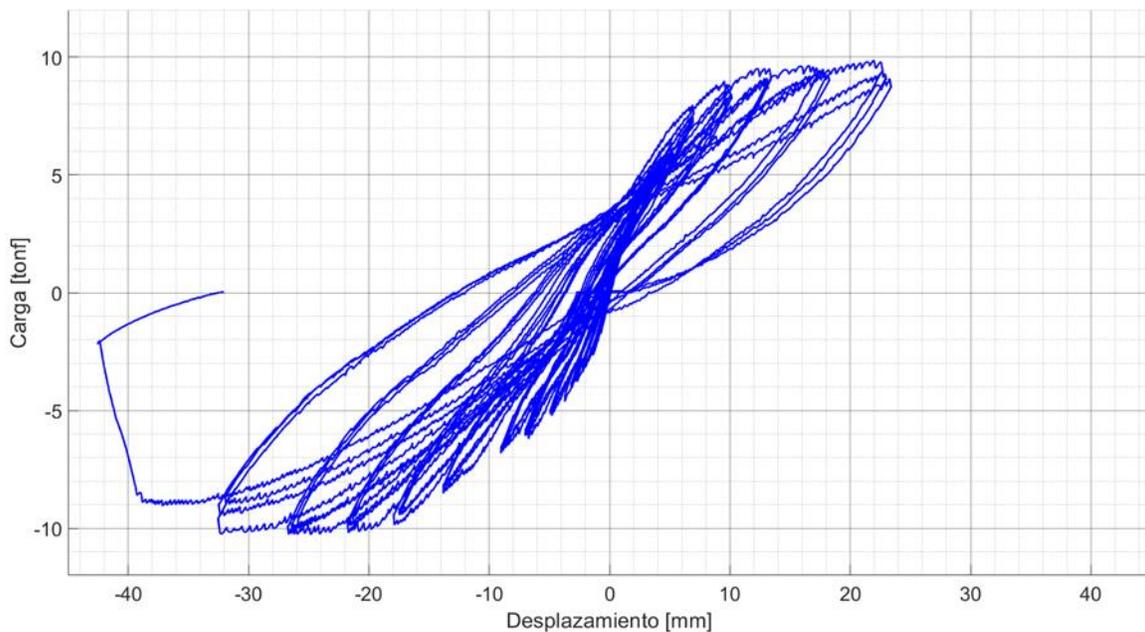


Figura 5.4: Curva de capacidad vs desplazamiento de techo corregido Muro hormigón normal.

En la Figura 5.5, utilizando las ecuaciones simplificadas mencionadas anteriormente para el cálculo de desplazamiento de corte, flexión y total, se observa que la mayor contribución es por flexión, que posee un 78% para ambas direcciones a medida que aumenta el desplazamiento de techo. También se destaca, una diferencia del 17,5% del desplazamiento total con respecto al desplazamiento de techo en el último desplazamiento de techo negativo. En cambio, para el desplazamiento positivo, la diferencia en ambos es de 10,37%.

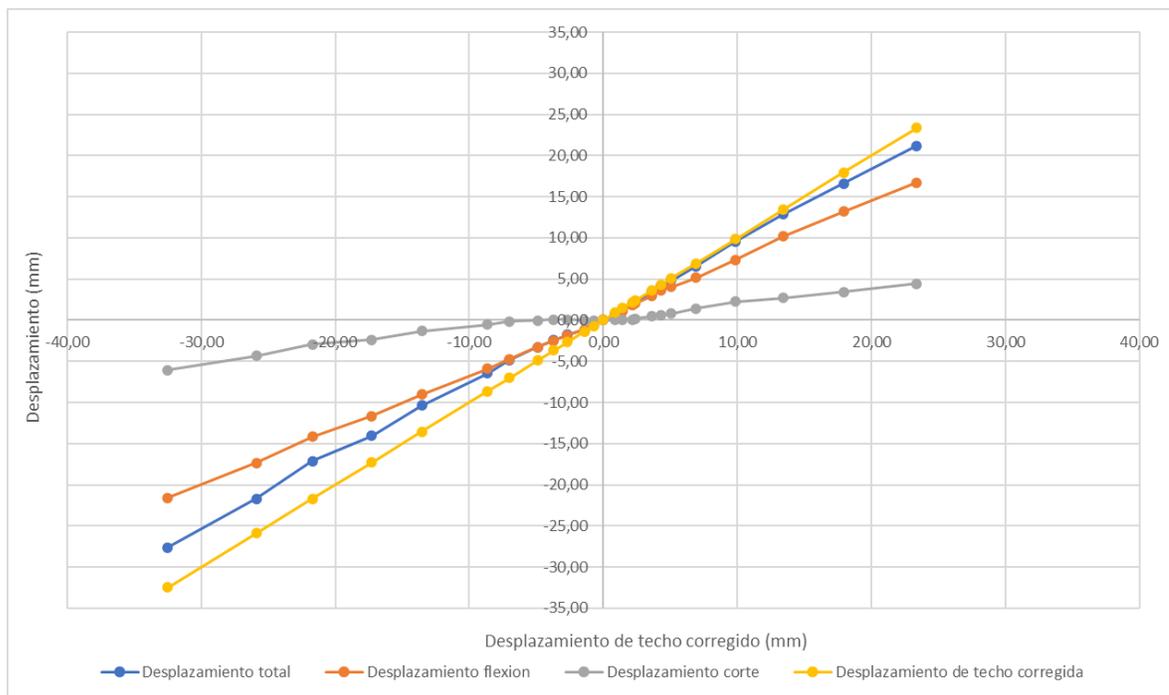


Figura 5.5: Gráfico de desplazamientos de flexión, corte y total con respecto al desplazamiento de techo - Muro de hormigón normal.

5.3. Evolución de daño en el muro base.

Durante el ensayo, como se muestra en la Figura 5.4, presenta una asimetría en desplazamiento por lo dicho anteriormente. En consecuencia, posterior al ensayo se observó, mediante los datos reales de los sensores críticos, que los desplazamientos para una misma deriva resultaron totalmente distintos. Por lo tanto, en este caso, se describirá su evolución de daño, por el lado Este y Oeste del muro, por separado debido a lo mencionado anteriormente y se detallaran los desplazamientos de techo reales durante el ensayo para cada porcentaje en [mm].

En el lado Este del muro, no se observaron fisuras o grietas en los primeros ciclos. Para el primer ciclo del 0,1% (el cual representa 1,43 [mm] de desplazamiento de techo) en dirección Oeste (desplazamiento positivo), se observan grietas horizontales superficiales a los 20 [cm] y 40 [cm]. Estas grietas horizontales se observaron antes del ensayo, ya que se ejerció esfuerzo fuera del plano en la colocación de las vigas de transferencia y por el peso de los instrumentos en el postensado transversal. Luego, a los 35 [cm] y 65 [cm] desde la base, se generan grietas diagonales superficiales (grieta por flexión) durante el tercer ciclo del 0,3% (3,46 [mm]) en dirección Oeste. Ya en el primer ciclo del 0,4% (4,28 [mm]) en dirección Oeste, se aprecia otra grieta diagonal superficial con mayor pendiente, la cual se encuentra 10 [cm] desde la base del muro, dicha grieta pasa por el hilo sinfín que sostiene los sensores al lado sur del muro.

En el primer ciclo del 0,5% (4,99 [mm]) en dirección Oeste, se observa que la grieta diagonal superficial a 65 [cm] se desarrolla hasta el centro del muro, no obstante, la grieta comienza a aumentar su pendiente, tendiendo a una dirección vertical cuando se encuentra con la grieta

horizontal a 40 [cm] desde la base del muro. Por otra parte, para la grieta diagonal a 35 [cm] de la base, se encuentra con la grieta horizontal inferior, pero su pendiente no se perturba.

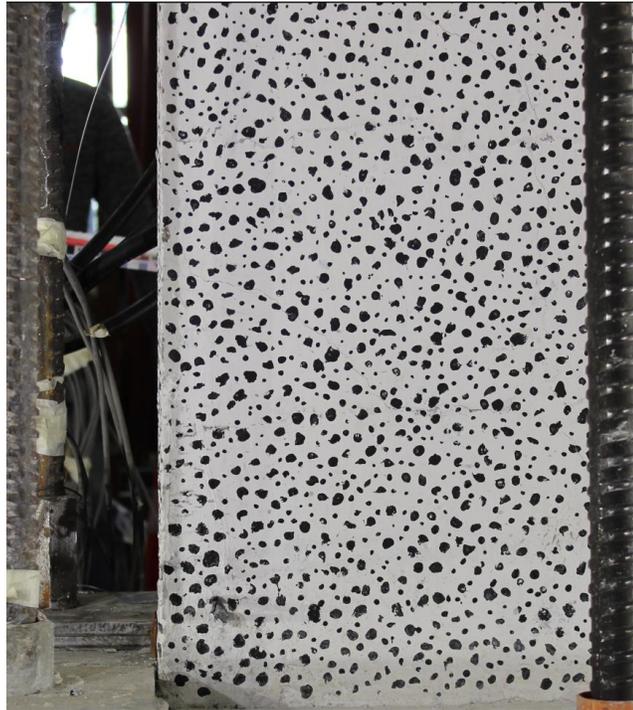


Figura 5.6: Visualización de grietas en el primer ciclo del desplazamiento peak Oeste – 0,5% (4,99 [mm]).

En el primer ciclo del 0,75% (6,88 [mm]) en dirección Oeste, se visualizan las grietas tanto diagonales como horizontales mencionados anteriormente. Además, se genera una grieta diagonal superficial a los 55 [cm] de la base del muro. Durante el primer ciclo de este porcentaje de deriva, se presenta la formación de pequeñas grietas en la base del muro del lado Este cuando este comprimido, dando indicios del pandeo local de la barra de borde. En los ciclos del 1% (9,54 [mm]) en dirección Oeste solo se presenta un mayor grosor de las grietas comparado con el anterior. Para el tercer ciclo del 1,25% (12,98 [mm]) en dirección Oeste, se observa un mayor desarrollo en las grietas producto del mayor desplazamiento de techo del muro, además, se genera una grieta vertical a 60 [cm] desde la base, cerca del eje central del muro. (Ver Figura 5.7)

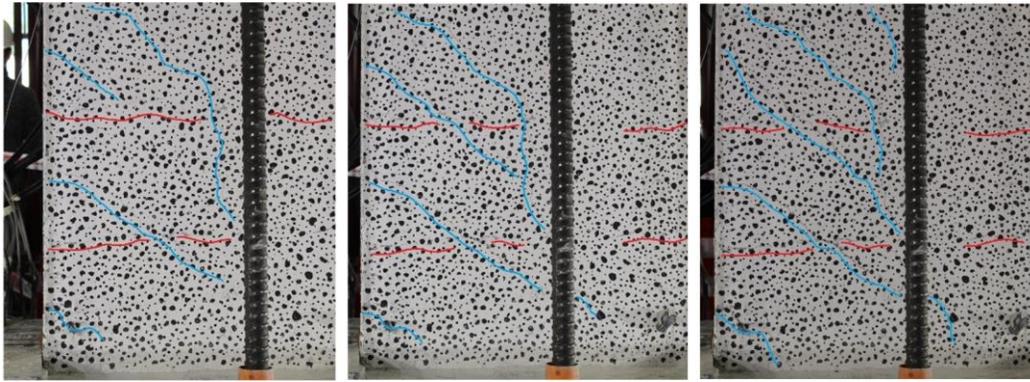


Figura 5.7: Evolución de grietas para 0,75% (6,88 [mm]), 1% (9,54 [mm]) y 1,25% (12,98 [mm]) en desplazamiento peak Oeste.

Durante el primer ciclo del 1,6% (16,69 [mm]) en dirección Oeste, se presenta la mayor resistencia en el lado Este del muro, la cual es de 10 [tonf], sin embargo, en el tercer ciclo del 1,6% (25,00 [mm]) en dirección Este, se observa una grieta vertical que nace a 20 [cm] de la base del muro, producto de un leve pandeo de la barra longitudinal. Posteriormente, en el primer ciclo del 2,00% (32,49 [mm]) en dirección Este, cuando está en compresión, comienza a desprenderse el hormigón en la zona de pandeo local de la barra de acero (Ver Figura 5.8). En la evolución de grietas para estos dos últimos peaks de desplazamientos, se mantienen en la dirección mostrada por la Figura 5.7, aumentando su apertura (grosor de la grieta) producto del aumento en el desplazamiento de techo.



Figura 5.8: Evolución de grieta por pandeo de barra longitudinal en los desplazamientos del tercer ciclo 1,6% (25,00 [mm], izquierda) y primer ciclo 2,00% (32,49 [mm], derecha) en dirección Este ambas.

Debido al leve movimiento fuera del plano que se inició en el 1,6% (25,00 [mm]) en dirección negativa (Este), el desprendimiento en la zona del pandeo local se da en el segundo ciclo del 2,00% (32,49 [mm]) en dirección Este y la exposición total de las 2 barras de acero pandeadas en el tercer ciclo del 2,00% (21,80 [mm]) en dirección Oeste (Ver Figura 5.9). Con respecto a las grietas principales (horizontales y diagonales), en estos dos últimos desplazamientos de techo en dirección Este, solo aumentan su grosor y desarrollo. Donde la grieta con mayor visibilidad es la grieta diagonal inferior que nace a los 40 [cm] de la base del muro mostrada en la Figura 5.10.



Figura 5.9: Proceso de desprendimiento del hormigón y exposición de las barras longitudinales de borde en los primeros dos ciclos del 2,00% (32,49 [mm]) dirección Este y el tercer ciclo del 2,00% (21,80 [mm]) dirección Oeste, orden de izquierda a derecha.



Figura 5.10: Evolución de grietas en el tercer ciclo del 2,00% (21,80 [mm]) en dirección Oeste.

Finalmente, el ensayo se detiene cuando comienza el primer ciclo del 2,5% en dirección Este, debido al desprendimiento en la base de la cara norte del muro, generando una inestabilidad lateral y en consecuencia una eventual caída del sistema de carga axial (Ver Figura 5.11). Dicho desprendimiento se debe al pandeo de la barra longitudinal de borde $\varnothing 6$ al momento de llegar al peak del desplazamiento de techo en dirección Este (Ver Figura 5.12), por lo tanto, al dar prioridad a la seguridad de las personas y evitar la caída total del muro, se procedió a detener la carga axial y por ende el ensayo.

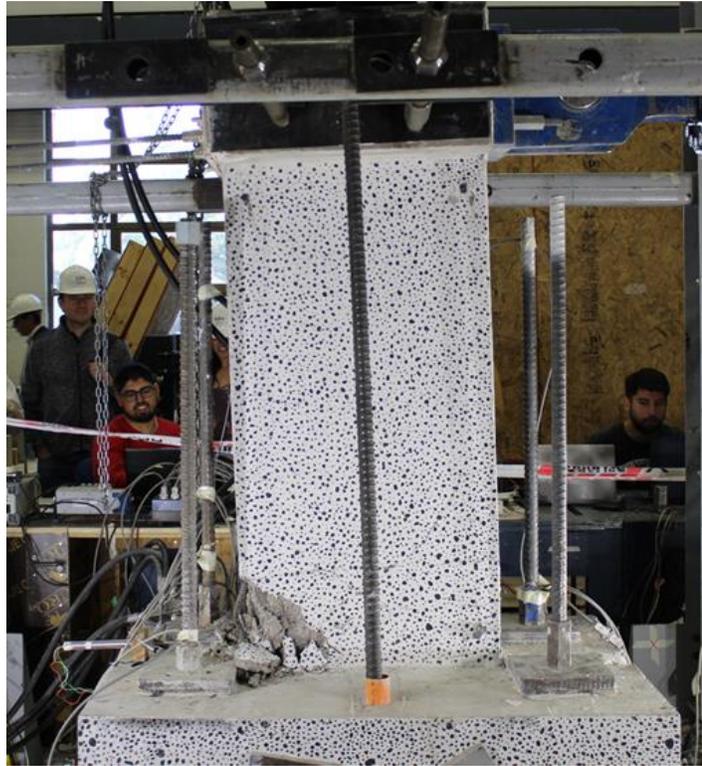


Figura 5.11: Estado final del muro hormigón normal, vista Lado norte.

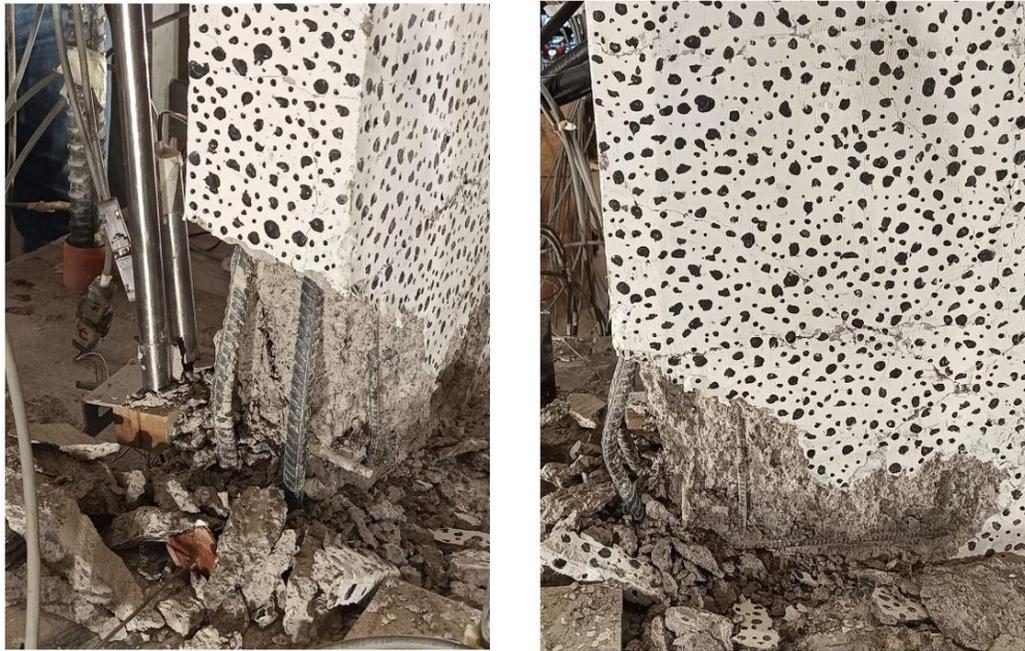


Figura 5.12: Pandeo de barras de borde, lado oeste del muro.

En el lado Oeste del muro, en los primeros ciclos, no se observan grietas, solo 2 fisuras superficiales horizontales las cuales están a 20 [cm] y 40 [cm] de la base del muro. El motivo de estas fisuras es el mismo para el lado Este, mencionado anteriormente.

En el tercer ciclo del 0,5% (8,92 [mm]) en dirección Este, se observa una grieta superficial diagonal a 35 [cm] de la base del muro y una grieta vertical cerca del centro del muro. En el primer ciclo del 0,75% (13,82 [mm]) en dirección Este, se aprecia un mayor largo de las grietas horizontales, mientras las grietas diagonales y verticales aumentan su grosor y desarrollo, en especial la grieta diagonal cuyo nacimiento es a los 40 [cm] de la base, ya que, en el primer ciclo del 1,0% (17,88 [mm]) en dirección Este, llega a la grieta horizontal inferior y se sigue desarrollando hasta el eje central del muro (Ver Figura 5.13).

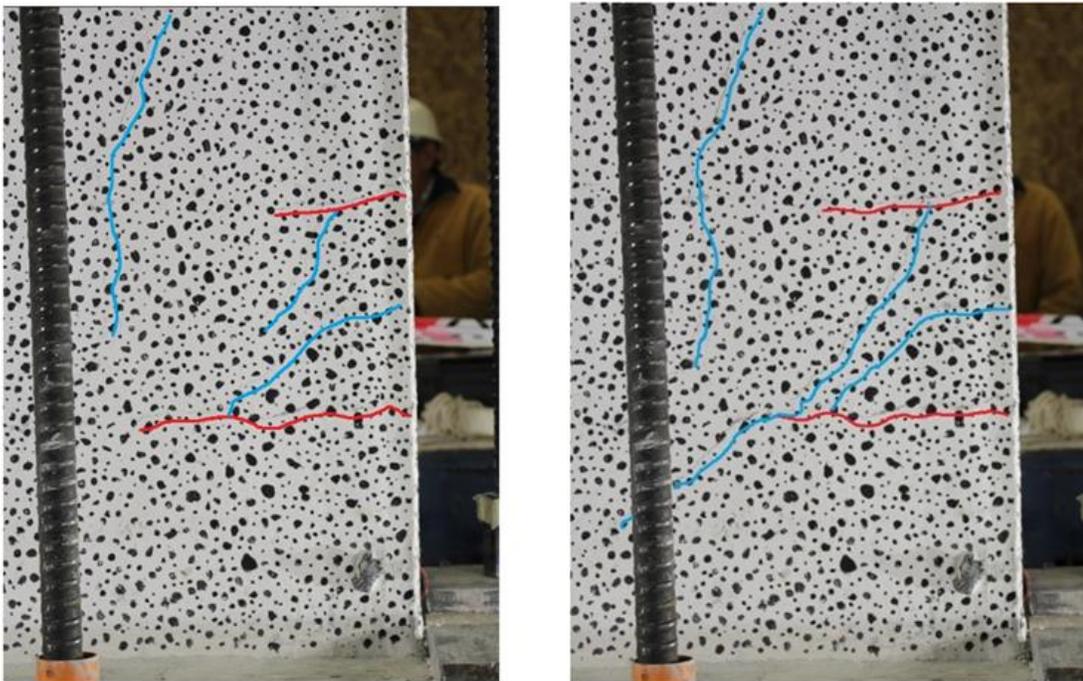


Figura 5.13: Evolución de grietas diagonales en el primer ciclo de los 0,75% (13,82 [mm]) y 1,0% (17,88 [mm]) de desplazamiento de techo en dirección Este.

Luego, en el primer ciclo del 1,25% (21,74 [mm]) en dirección Este, las grietas mencionadas anteriormente, aumentan su amplitud, además de producirse grietas superficiales en el borde del muro. Dichas grietas superficiales, están entre 40-60 [cm] y 8-10 [cm] desde la base del muro. Después, en el tercer ciclo del 1,6%(25,00[mm]) dirección Este, se observa con mayor notoriedad las grietas superficiales, desarrollándose de mejor manera (Ver Figura 5.14).

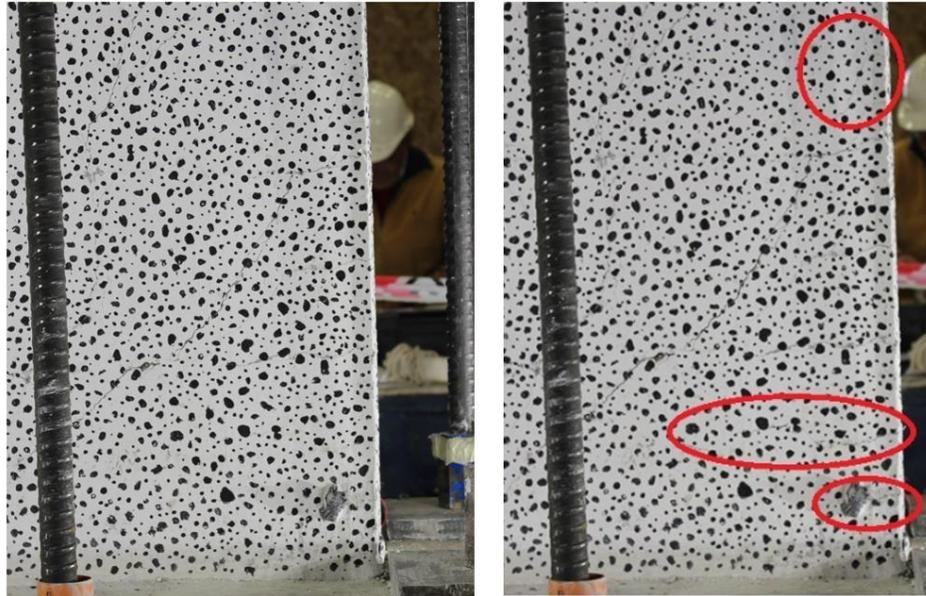


Figura 5.14: Evolución de grietas en lado Oeste del muro ante desplazamientos de techo de 1,25% (21,74 [mm], foto izquierda) y 1,6% (25,00 [mm], foto derecha) en dirección Este.

Finalmente, se observa que en el tercer ciclo del 2,00% (32,49 [mm]) en dirección Este, se sigue desarrollando la grieta diagonal, cuyo nacimiento fue a los 60 [cm] de la base del muro, pero aumenta su pendiente, tendiendo a ser vertical al llegar al centro del muro. Además, se presta atención que la grieta diagonal, la cual se generó a los 40 [cm] de la base, no alcanza al borde Este del muro, asimismo, se presenta una mayor amplitud en comparación a las demás grietas. En lo que respecta al pandeo de las barras longitudinales de borde, estas no sucedieron, debido que, su desplazamiento de techo final fue menor que el lado Este. (Ver Figura 5.15)



Figura 5.15: Evolución de grietas en desplazamientos peaks Este(izquierda) y Oeste(derecha) durante el tercer ciclo para los desplazamientos de techo de 2,00% (32,49 [mm]) y 2,00% (21,80 [mm]) respectivamente.

5.4. Respuesta global del muro de hormigón con fibras de PVA

El muro de hormigón armado reforzado con fibras de PVA es idéntico con respecto a la geometría, enfierradura y condiciones ambientales, sin embargo, las condiciones de los elementos estructurales, particularmente las fundaciones, sufrieron daños en zonas de recubrimiento (sin exposición de armadura), por lo que se utilizó Sikarep para reparar las zonas de recubrimiento, dada la importancia de reparación en la zona de fricción entre la base del muro y las fundaciones. La carga axial al muro es igual al muro anterior, el cual es 16 [tonf]. Como se mencionó anteriormente, la carga axial se realizó con 4 gatos hidráulicos en simultaneo donde 2 son del sistema de carga axial y 2 puestos en la losa, con el propósito de disminuir la fluctuación durante el ensayo.

Para este ensayo, dado que el anterior resultado asimétrico, se decide que el sensor superior controle el ensayo entregando el desplazamiento de techo real, donde dicha información es enviada al software LabVIEW, asimismo, se ajustan y ratifican los signos de los sensores para la ecuación de corrección en el programa. Utilizando este método de control, se asegura que tanto el desplazamiento del sensor superior como el desplazamiento de techo corregido (producto de la ecuación de corrección) obtengan valores similares entregados por el programa a lo largo del ensayo, el cual resultado como se aprecia en la Figura 5.16.

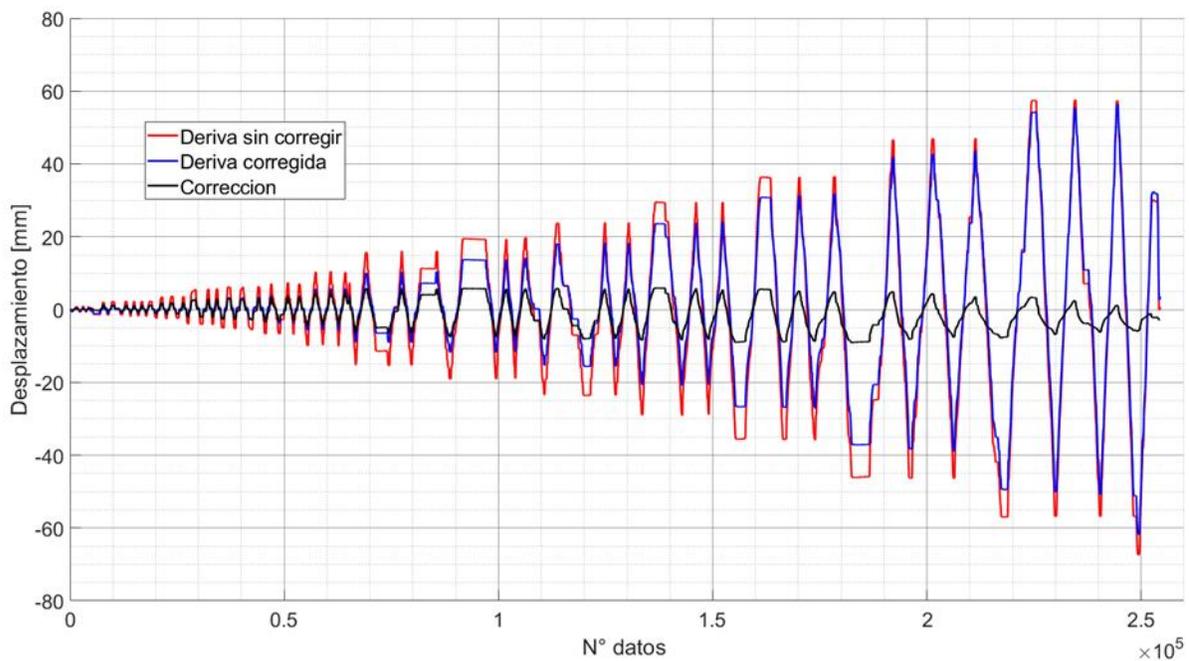


Figura 5.16: Corrección de desplazamiento de techo en Muro hormigón con fibras PVA.

En la Figura 5.17, se observa que el muro de hormigón reforzado con fibras de PVA presentó una resistencia máxima de 10,8 [tonf] para desplazamiento negativo de techo y 11,0 [tonf] para desplazamiento positivo. El comportamiento de linealidad en ambos lados se presenta hasta los 5,8 [mm] (0,75%) en ambos lados. La degradación de la resistencia se aprecia en los tres ciclos a partir de los 43,5 [mm] de desplazamiento aproximadamente. Además, durante el primer ciclo del 4,0% de drift en dirección Este (desplazamiento negativo), ocurrió una caída abrupta de carga llegando al peak, debido al corte de una barra longitudinal. El ensayo se detuvo cuando completó el primer ciclo del peak Este en el 5,0%, producto de la inestabilidad lateral del muro.

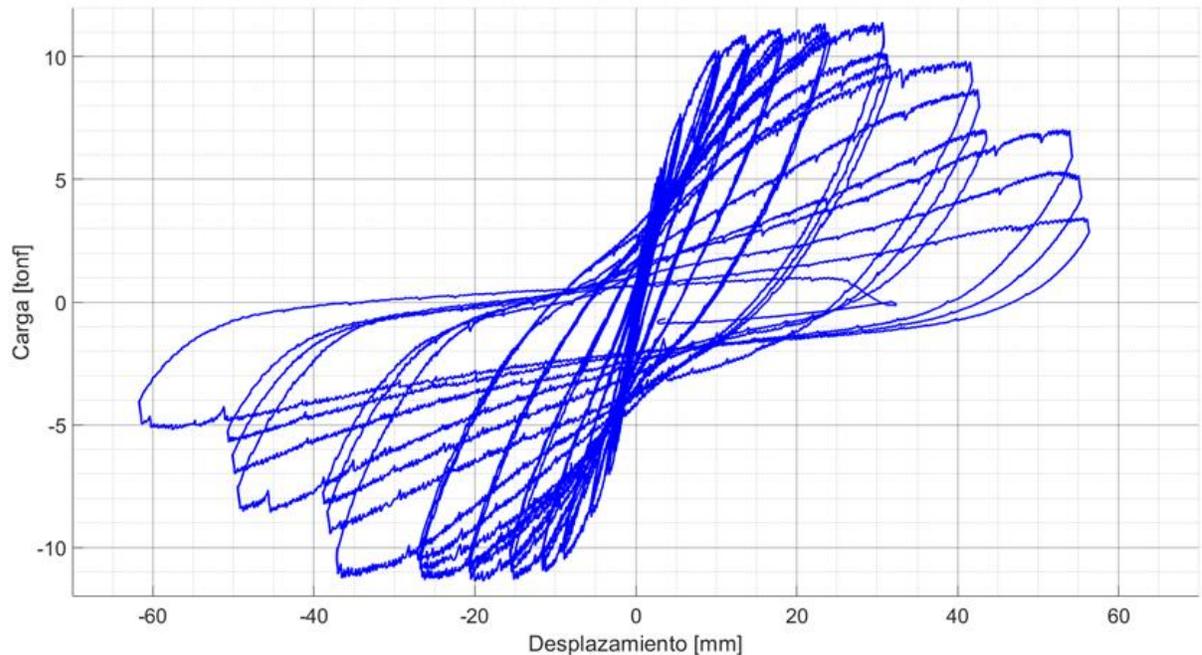


Figura 5.17: Curva de capacidad vs desplazamiento de techo corregido Muro hormigón armado con fibra PVA de refuerzo.

Con respecto a los desplazamientos de flexión y de corte, se deciden acotar los desplazamientos, ya que, en ciclos mayores al 2,5% se presentó un movimiento de un hilo sinfín localizado en la rótula plástica, generando rotación para los sensores en dicho lugar. (Ver Figura 5.18)



Figura 5.18: Evolución de rotación varilla de LVDT en el primer ciclo del 2,0% y 2,5% en dirección Este, y posición central en el tercer ciclo del 3,2% (de izquierda a derecha)

Al igual que el muro anterior, en la Figura 5.19, presenta una mayor contribución el desplazamiento de flexión, el cual es un 85% con respecto al desplazamiento total para derivas del 2,5%. La diferencia entre el desplazamiento total y real en la misma deriva es de 48% en dirección Este (desp. Negativo) y 21% en dirección Oeste (desp. Positivo) para la misma deriva.

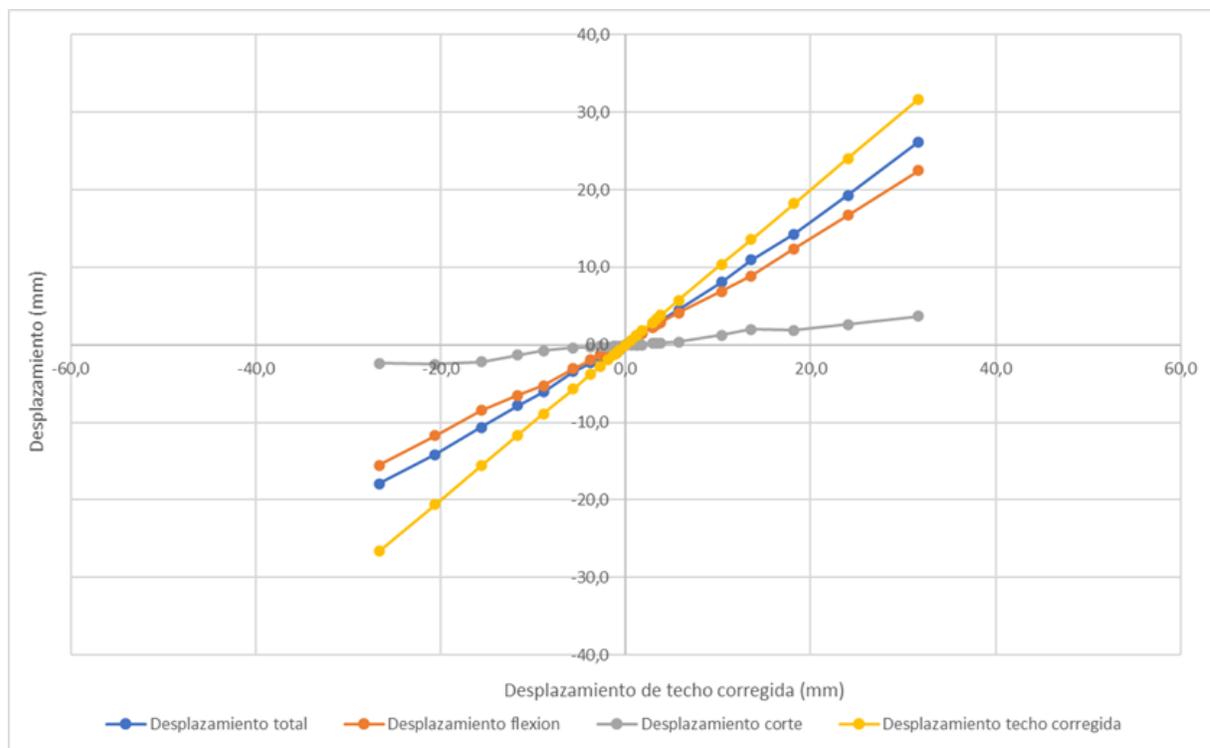


Figura 5.19: Grafico de desplazamientos de flexión, corte y total con respecto al desplazamiento de techo - Muro de hormigón con fibras PVA.

5.5. Evolución de daño en muro de hormigón con fibras de PVA.

En este ensayo se detallará la evolución de grietas con los porcentajes de deriva, mencionados al comienzo de este capítulo (Ver Tabla 5.1). Durante los primeros ciclos del ensayo, el muro no presento grietas o fisuras. Cuando está en el 0,4% y 0,5% de drift en dirección Este y Oeste, se observan fisuras muy superficiales en el borde del muro, donde las grietas están separadas cada 10 [cm] en la base del muro (zona de rotula plástica) también se presentan fisuras superficiales en la parte alta del muro. Luego en el 0,75% de drift, tanto en dirección Este como Oeste, se observan el desarrollo de dichas grietas producto de la flexión (Ver Figura 5.20). En el 1,00%, se desarrollan las grietas mencionadas anteriormente, sin observar la adición de otra fisura o grieta superficial. (Ver Figura 5.21)

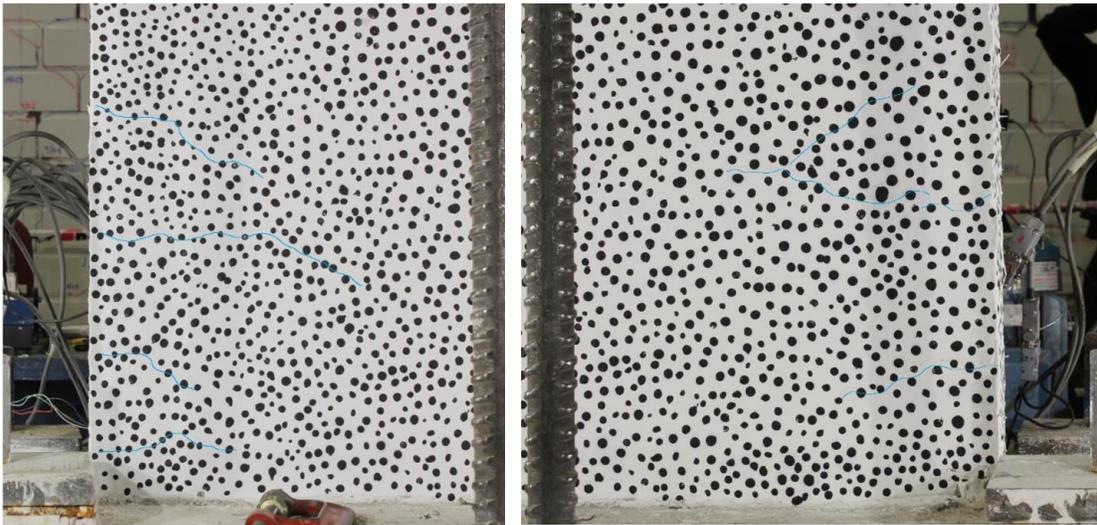


Figura 5.20: Grietas superficiales en el primer ciclo del 0,75% en dirección Oeste(izquierda) y Este(derecha).



Figura 5.21: Grietas por flexión en el primer ciclo del 1,00% en dirección Oeste(izquierda) y Este (derecha).

Luego, en el primer ciclo del 1,25% en dirección Este, se observan las grietas de flexión en el lado sur y una grieta horizontal en la base del muro, cuya ubicación es la misma del refuerzo horizontal. En el 1,6% en dirección Este, se aprecia en el primer ciclo, el desarrollo de la grieta horizontal en la zona inferior lado Sur del muro (Ver Figura 5.22). Además, en el lado norte se produce un mayor desarrollo de las grietas aproximándose al centro del muro durante los tres ciclos. (Ver Figura 5.23)

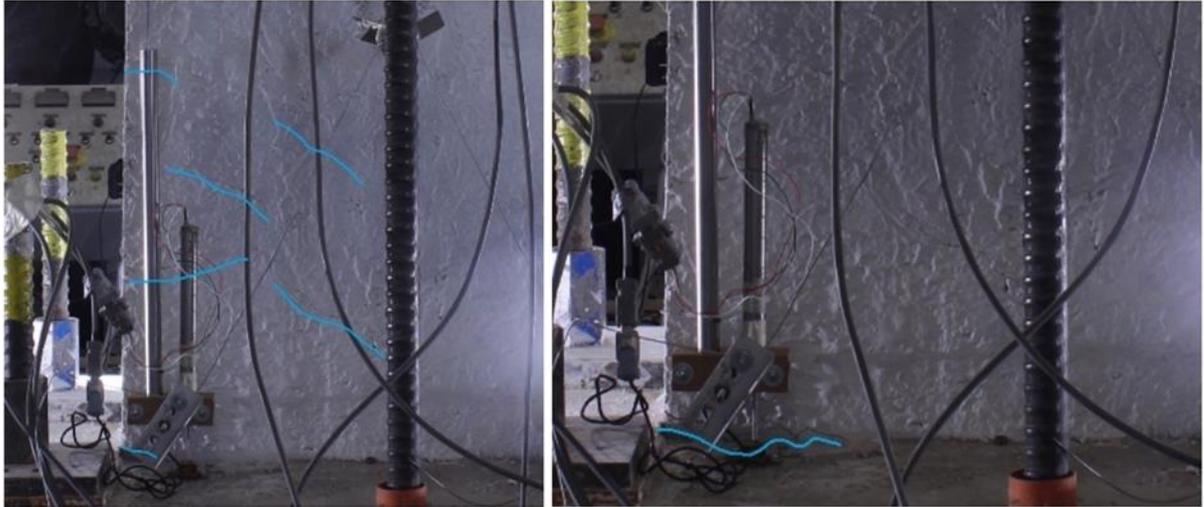


Figura 5.22: Evolución de grietas en el primer ciclo del 1,25% y 1,60% de drift en dirección Este, Vista Sur.

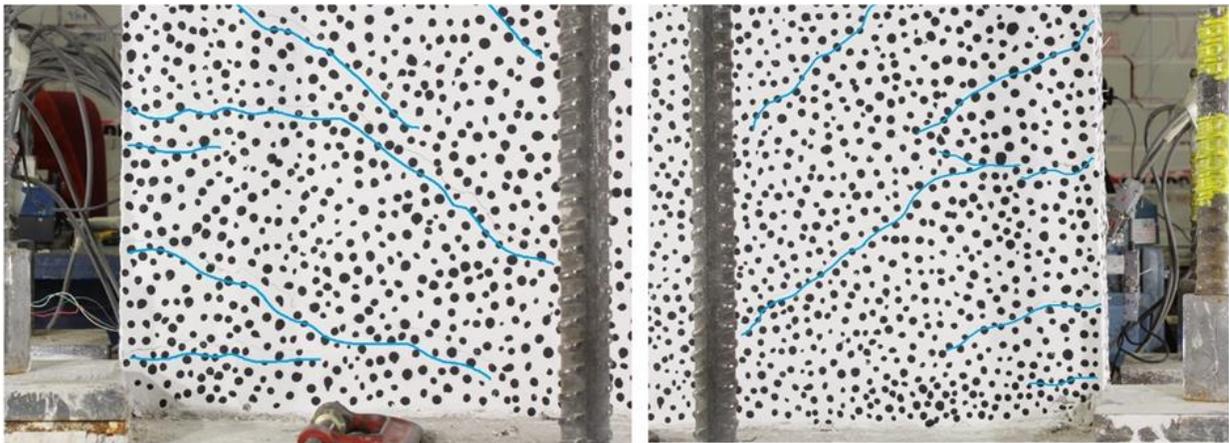


Figura 5.23: Evolución de grietas en el primer(izquierda) y tercer(derecha) ciclo del 1,6% en dirección Oeste y Este respectivamente.

En el tercer ciclo del 2% en dirección Oeste, la grieta horizontal del lado Sur del muro se desarrolla aún más, aproximándose al centro y el grosor de esta aumenta notoriamente, sin embargo, la integridad del muro no ha sido afectada, producto de la resistencia sostenida en los tres ciclos. Luego, observando la misma cara del muro, en el primer ciclo del 2,5% en dirección Oeste, donde se alcanza el peak de resistencia, la grieta horizontal aumenta su visibilidad (Ver

Figura 5.24). En ese momento se logró observar el trabajo de las fibras de PVA en el hormigón en dicho lugar (Ver Figura 5.25).



Figura 5.24: Desarrollo de la grieta horizontal en tercer ciclo del 2%(izquierda) y primer ciclo del 2,5%(derecha), ambos desplazamientos en dirección Este.



Figura 5.25: Trabajo de las fibras de PVA en el primer ciclo 2,5% en dirección Este.

Luego del primer ciclo del 2,5%, el muro entra en la degradación, dado que la resistencia baja paulatinamente. Durante el segundo ciclo, cuando la dirección de la fuerza se dirige al Oeste, se generaron grietas en el espesor del muro, indicando el pandeo de las barras de acero longitudinales de borde (Ver Figura 5.26). Con respecto a las grietas por flexión, estas no aumentan su grosor a excepción de las grietas que se encuentran dentro de los 10 [cm] desde la base del muro (Ver Figura 5.27).

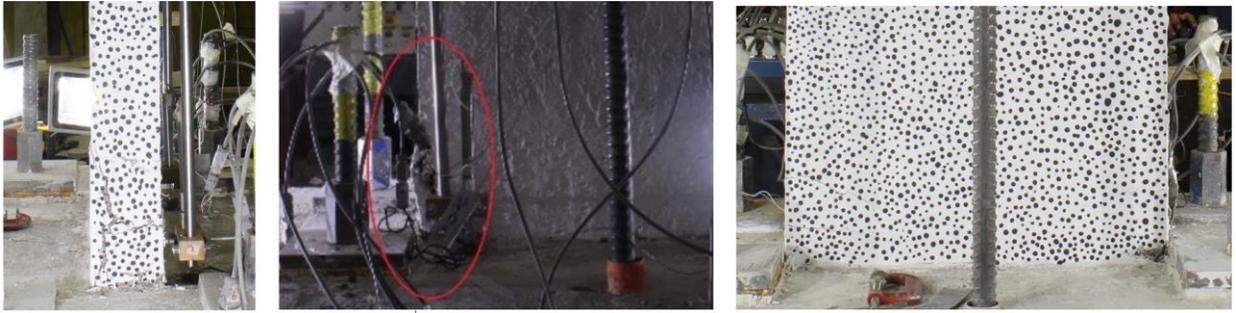


Figura 5.26: Pandeo de barra longitudinal de borde en segundo ciclo del 2,5% en dirección Oeste. Vista Oeste(izquierda), vista Sur (al medio) y vista Norte(derecha).



Figura 5.27: Desarrollo de daño del muro en lado Oeste durante Primer(izquierda), segundo (al medio) y tercer(derecha) ciclo del 2,5% en dirección Este.

A partir del segundo ciclo del 3,2% en dirección Este, se observa el pandeo de la barra de acero longitudinal de borde en el lado Este, desprendiendo el hormigón (Ver Figura 5.28). Luego, en el tercer ciclo del 3,2% en la posición central, ocurre desprendimiento del muro tanto en la cara norte, debido al pandeo fuera del plano de la barra longitudinal $\varnothing 6$ [mm] que está ubicado a 7[cm] de la barra longitudinal $\varnothing 12$ [mm] (Ver Figura 5.29).



Figura 5.28: Pandeo local de barras longitudinales de borde en cara Este del muro. Primer, segundo y tercer ciclo (de izquierda a derecha) de 3,2% en dirección Este.



Figura 5.29: Desprendimiento de lado Este del muro por pandeo de barras longitudinales. Vista Sur(izquierda), vista norte (al medio) y vista Este(derecha).

En el tercer ciclo del 3,2% de drift en dirección Este y Oeste, las grietas diagonales se desarrollan, pero no aumentan su grosor. Sin embargo, el mayor daño se encuentra focalizado en los bordes de la base del muro, como se muestra en la Figura 5.30

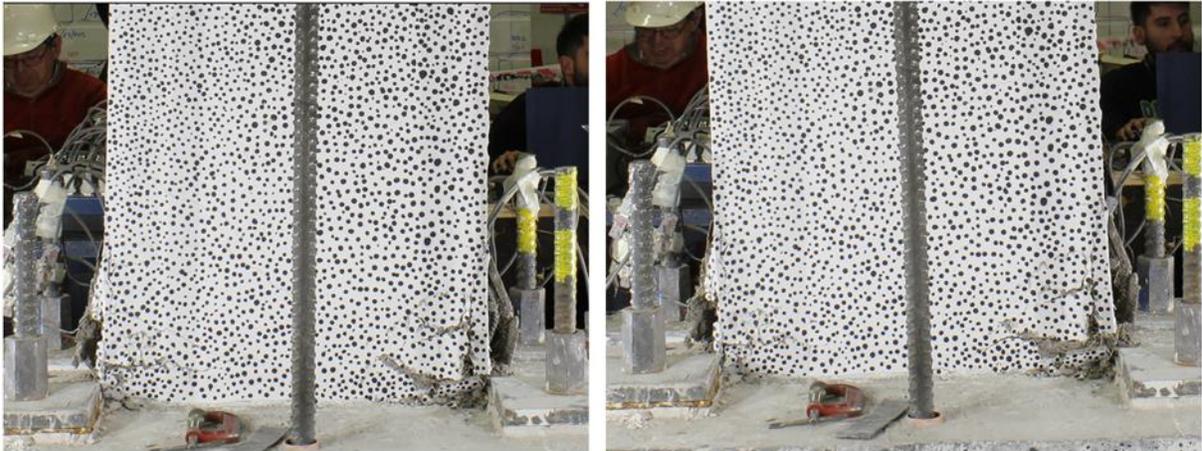


Figura 5.30: Evolución de grietas en desplazamiento Oeste(izquierda) y Este(derecha) del tercer ciclo de 3,2%.

Cuando se alcanza el peak de desplazamiento en dirección Este, se produce un corte de la barra longitudinal $\varnothing 6$, dicho suceso se ratifica en la curva de capacidad vs desplazamiento (Ver Figura 5.17). Posterior al peak de dicho desplazamiento, en la posición central, se observa el corte de la barra y la leve inestabilidad de las barras longitudinales de borde producto del leve movimiento fuera del plano en el muro. (Ver Figura 5.31).



Figura 5.31: Corte de la barra $\phi 6$ longitudinal e inclinación de barras longitudinales fuera del plano.

Durante el tercer ciclo del 4%, se observaron que las grietas diagonales si bien son apreciables, estas solo aumentan su largo, pero no su espesor, demostrando el trabajo de las fibras de PVA ante cargas de tracción y compresión. También, en la zona baja del muro, las cuales sufrieron un mayor daño en los bordes, se desarrollaron grietas horizontales a 5 [cm] de la base del muro, tal como se muestra en la Figura 5.32.

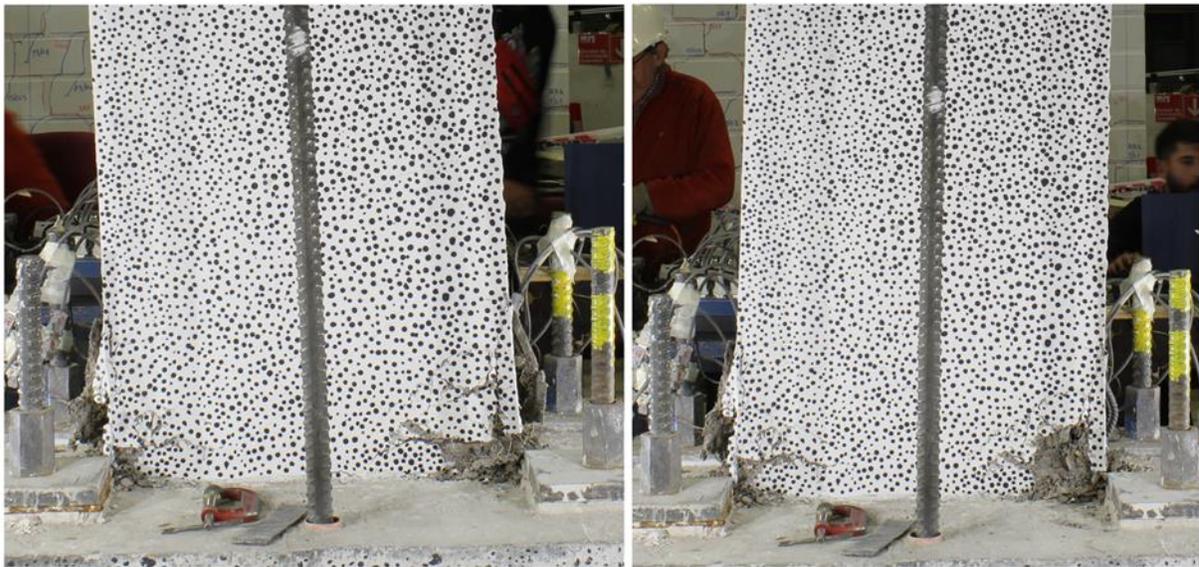


Figura 5.32: Evolución de grietas en desplazamientos peaks Este(izquierda) y Oeste(derecha) durante el tercer ciclo del drift 4%.

Finalmente, en el 5% de deriva, se realizó el desplazamiento peak en dirección Este, alcanzando una resistencia del 2,1 [tonf] (Ver Figura 5.33 y Figura 5.34), sin embargo, el ensayo se detuvo, debido a la inestabilidad lateral del muro producida por la carga axial aplicada en el muro, por lo que se decide terminar el ensayo por seguridad.

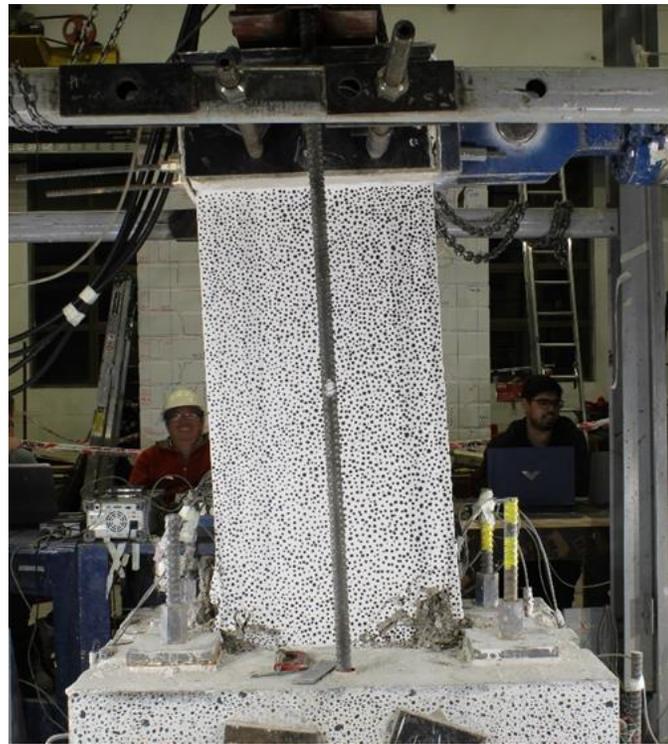


Figura 5.33: Primer ciclo en dirección Este con 5% de drift, vista Norte.

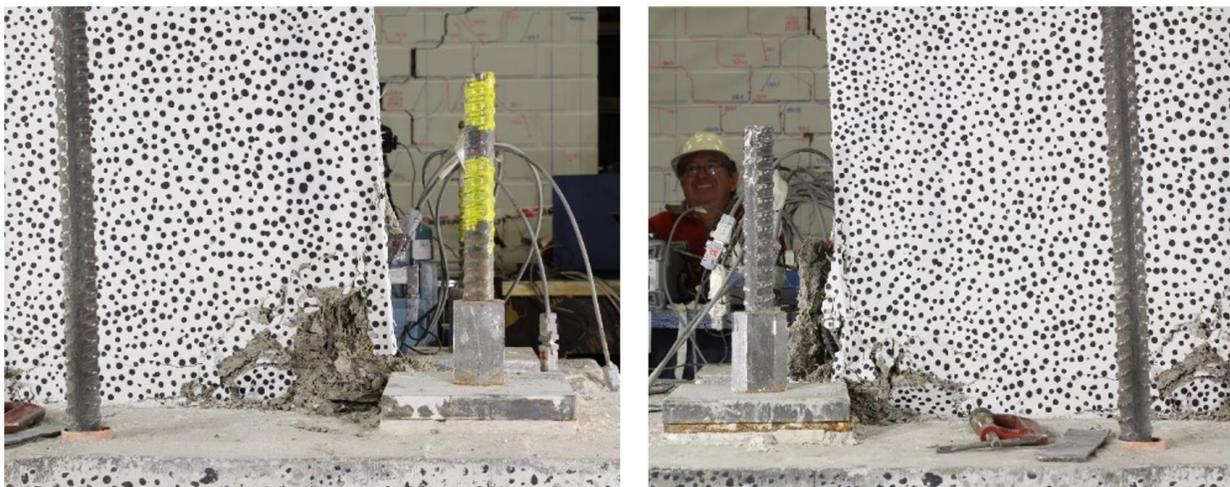


Figura 5.34: Primer ciclo en dirección Este con 5% de drift, vista Norte, lado Oeste(izquierda) y Este(derecha).

Posterior al ensayo, se desprendió manualmente una sección de la rótula plástica del muro, para observar la armadura en dicho sector. Donde, se deduce que el pandeo fuera del plano de

las barras longitudinales $\varnothing 6$ [mm] generaron las grietas horizontales en la cara Norte del muro de hormigón con fibras PVA. (Ver Figura 5.35)



Figura 5.35: Pandeo de barras longitudinales de borde en cara norte del muro post-ensayo.

5.6. Análisis comparativo

En esta sección, se realizará una comparación de ambos muros. La Figura 5.36, muestra la curva de Capacidad vs Desplazamiento de techo para cada muro, donde se observa un leve aumento en su resistencia y un aumento significativo en su ductilidad para el muro de hormigón con fibras de PVA. Si bien, se aprecia que la curva del primer ensayo no resulta simétrica, para el análisis comparativo, se estudiara la ductilidad y disipación de energía en el desplazamiento negativo (dirección Este), ya que, el primer muro alcanzo mayores valores de desplazamiento en dicha dirección antes de su fallo total.

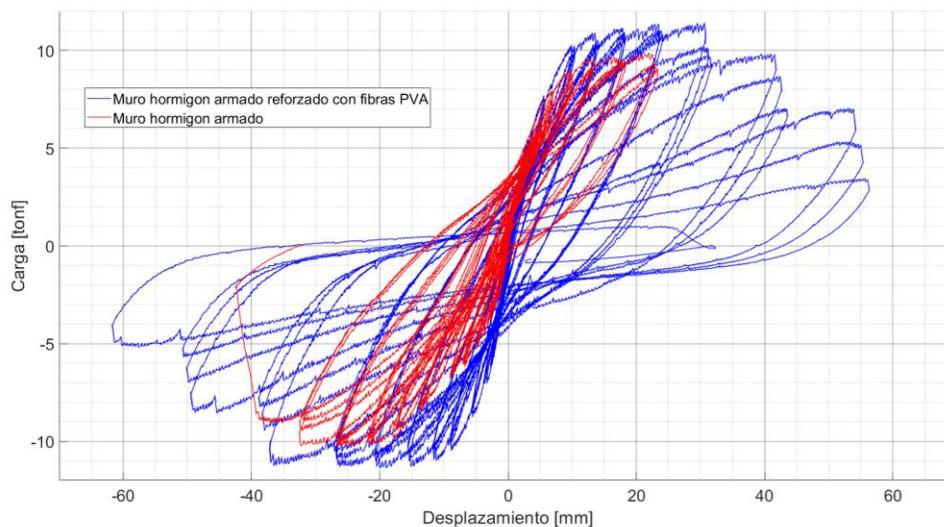


Figura 5.36: Curva comparativa de capacidad vs desplazamiento de techo.

5.6.1. Rigidez

De acuerdo con el gráfico comparativo de la Figura 5.36, se induce que, para ambos ensayos tanto en los desplazamientos positivos como negativos, la rigidez lateral secante, la cual es la pendiente en la curva Capacidad vs Desplazamiento, se observa que, en el muro de hormigón con fibras de PVA, la pendiente de rigidez es similar al muro de hormigón normal. Asimismo, el refuerzo tanto horizontal como vertical, las condiciones ambientales y montaje experimental fueron similares en ambas probetas. Por lo tanto, la variación ante un aumento de la rigidez en desplazamientos iguales o similares recae principalmente en la capacidad de ambos muros, ya que está directamente relacionada con la rigidez. Ante esto, se aprecia que la probeta de hormigón con fibras de PVA presenta un aumento en la capacidad de carga de techo, aproximadamente del 10%, para ambos desplazamientos. Por lo tanto, dado el aumento de carga, la rigidez del muro de fibras PVA aumenta en un 10%, tal como se muestra en la Figura 5.37, mostrando una curva decreciente paralela a la curva de rigidez del muro de hormigón normal. En lo que respecta a la simetría de rigidez para ambos muros con respecto al “eje y”, se observa que en el muro de hormigón con fibras PVA, presenta una simetría muy similar en ambas direcciones, sin embargo, para el muro de hormigón normal, presenta una pequeña asimetría, ya que, en desplazamientos negativos ocurre una caída abrupta de rigidez. Esta caída de rigidez puede estar relacionada al no utilizar el vibrador durante el proceso de hormigonado, por lo que volúmenes de aire podrían haber estado al interior de la probeta, dada la presencia de nidos en los bordes del muro y fundación de este cuando se retiró del moldaje.

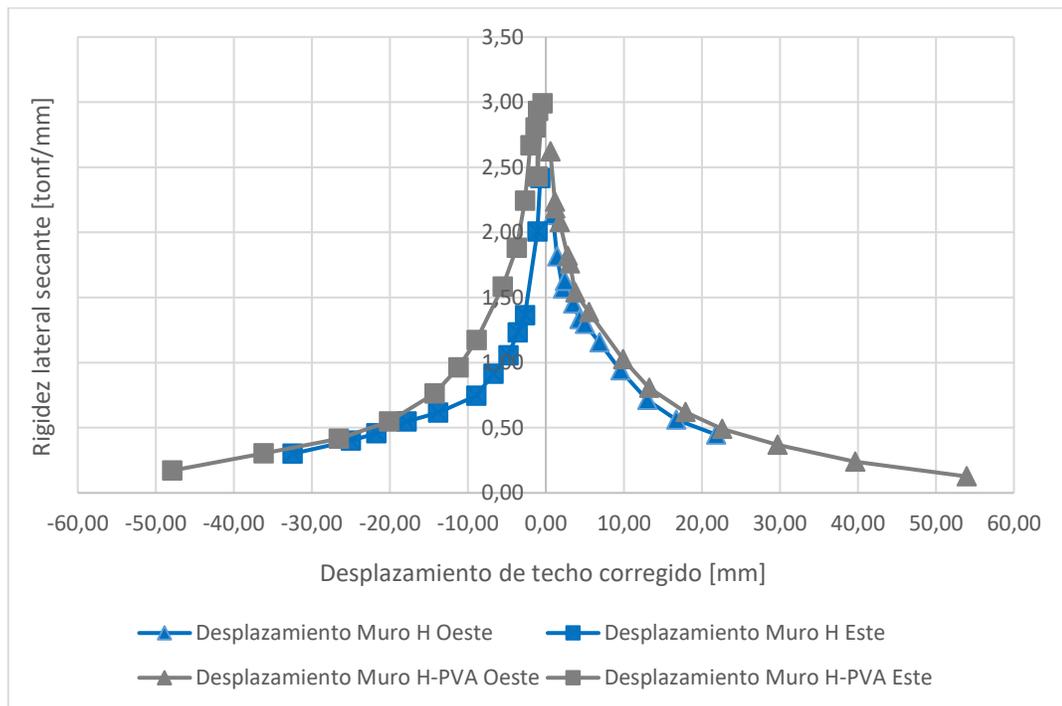


Figura 5.37: Curva de rigidez del muro de hormigón y muro hormigón con fibras PVA.

Tabla 5.2: Tabla de rigidez secante lateral - Muro de hormigón sin fibras PVA.

Muro Hormigón sin fibras PVA			
Desplazamiento [mm]	Rigidez lateral secante [tonf/mm]	Desplazamiento [mm]	Rigidez lateral secante [tonf/mm]
-0,72	2,42	0,88	2,13
-1,11	2,00	1,43	1,82
-2,67	1,36	2,17	1,57
-3,61	1,23	2,42	1,63
-4,83	1,06	3,46	1,45
-6,73	0,91	4,28	1,33
-8,92	0,75	4,99	1,30
-13,82	0,62	6,88	1,15
-17,88	0,55	9,54	0,94
-21,74	0,46	12,98	0,71
-25,00	0,40	16,69	0,56
-32,49	0,30	21,80	0,45

Tabla 5.3: Tabla de rigidez secante lateral - Muro de hormigón con fibras PVA

Muro Hormigón con fibras PVA			
Desplazamiento [mm]	Rigidez lateral secante [tonf/mm]	Desplazamiento [mm]	Rigidez lateral secante [tonf/mm]
-0,45	2,99	0,57	2,62
-1,08	2,43	1,15	2,24
-1,02	2,93	1,19	2,18
-1,33	2,80	1,78	2,08
-1,97	2,67	2,78	1,82
-2,69	2,24	3,08	1,76
-3,74	1,88	3,78	1,54
-5,53	1,58	5,54	1,39
-8,88	1,17	9,90	1,03
-11,21	0,96	13,22	0,81
-14,26	0,76	17,88	0,62
-20,10	0,55	22,57	0,49
-26,6	0,42	29,69	0,37
-36,2	0,30	39,66	0,24
-47,9	0,17	53,94	0,13

5.6.2. Resistencia y degradación

La Tabla 5.4, indica que los valores de degradación de resistencia para desplazamientos positivos (dirección Oeste), demuestran una baja paulatina en su resistencia hasta llegar al 7,37%. Esto es debido que, los desplazamientos son menores en comparación a la dirección negativa, por lo que las barras de borde del lado Oeste del muro, no presentaron un pandeo local y por ende no ocurrió el desprendimiento del hormigón de las barras de acero. Para desplazamientos negativos, no presenta una degradación mayor al 20%, sin embargo, la resistencia disminuye más rápido, producto de estar un desplazamiento mayor que la dirección contraria y por el pandeo local de las barras de borde del lado Este del muro.

Tabla 5.4: Degradación de la resistencia - Muro hormigón normal

Ciclo	N ciclo	Desplazamiento [mm]	Carga máxima [tonf]	Carga [tonf]	Degradación [%]
2%	1	22,63	9,5	9,5	0,00
	2	22,95		9,1	4,21
	3	23,37		8,8	7,37
-2%	1	-32,50	-10,0	-9,7	3,00
	2	-32,47		-9,1	9,00
	3	-31,85		-8,8	12,00

En la Tabla 5.5, se muestra que en el segundo ciclo del 3,2% de drift, la resistencia para desplazamientos negativos (dirección Este), disminuye abruptamente. Esta disminución abrupta de resistencia se debe al corte de una barra de borde $\varnothing 6$ en el lado Oeste del muro, lo cual se muestra en la Figura 5.17, sin embargo, la degradación no supera el 20% hasta completar el tercer ciclo, donde llega a una degradación del 26,85%. Producto del suceso mencionado anteriormente, la capacidad de resistencia para desplazamientos positivos (dirección Oeste), disminuye más rápido, donde llega al 25,45% de degradación en el segundo ciclo, debido al daño en el elemento de borde producido por el pandeo local de las barras de borde, las cuales se formaron en el 2,5% de drift. Posterior a este drift, completa los tres ciclos para el 4% en ambas direcciones y finaliza al iniciar el primer ciclo del 5%.

Tabla 5.5: Degradación de la resistencia - Muro hormigón con fibras PVA.

Ciclo	N ciclo	Desplazamiento [mm]	Carga máxima [tonf]	Carga [tonf]	Degradación [%]
3,2%	1	53,92	11	9,2	16,36
	2	55,23		8,2	25,45
	3	56,21		6,7	39,09
-3,2%	1	-49,38	-10,8	-10,7	0,93
	2	-50,11		-8,8	18,52
	3	-50,67		-7,9	26,85

Comparando ambas resistencias máximas, el muro de hormigón con fibras de PVA como refuerzo, presento una resistencia máxima de 11[tonf], así mismo, para el muro de hormigón normal, la resistencia fue de 10[tonf]. Por lo tanto, el uso de las fibras de PVA como refuerzo para un muro de hormigón armado, aumenta su capacidad en un 10%.

5.6.3. Deriva de techo y disipación de energía

La deriva máxima concierne al desplazamiento de techo máximo alcanzado por el muro antes de que falle (criterio del 20% en degradación). En el muro de hormigón normal corresponde a 31,85 [mm] y en el muro de hormigón con fibras de PVA a 50,11 [mm]. Sin embargo, en el ensayo completo, el muro de hormigón con fibras PVA, posterior a dicho porcentaje de degradación, continuó ensayándose, alcanzando un peak de desplazamiento de -61,72 [mm]. Al comparar ambas ductilidades utilizando los peaks máximos de desplazamientos en ambos muros, se observó un aumento del 134,18% del muro de fibras de PVA con respecto al muro base.

Con relación a la energía disipada en ambos muros, en el muro de hormigón normal, producto de la asimetría en la curva de Capacidad vs Desplazamiento, se utiliza la información solo para la dirección Este (desplazamiento negativo), por lo tanto, para el cálculo de la energía disipada, se obtiene el valor en los ciclos de dicho sentido y se multiplican por dos. De esta manera, se emula la misma energía para la dirección Este y Oeste.

En la Figura 5.38, se observa en líneas punteadas la energía disipada en cada desplazamiento de techo, mientras que la línea continua representa la cantidad de energía disipada acumulada durante el ensayo. El criterio utilizado para el cálculo de la energía disipada es calcular el área bajo la curva del grafico de Capacidad vs Desplazamiento (Ver Figura 5.36), hasta el ciclo donde su degradación de resistencia no sea mayor al 20%, sin embargo, en los ciclos donde el muro falla (mayor al 20% de degradación), se consideraron en el cálculo, para observar la disipación total de energía hasta el fallo total del muro. Una vez planteado esto, se observa que ambos muros se comportan de manera similar, sin embargo, para el muro con fibras PVA, presenta un pequeño aumento antes de la degradación del 20%. Dicho aumento es producto del aumento de la capacidad mostrada en la Figura 5.36, la cual es el 10% con respecto al muro convencional. Debido a la degradación mayor al 20% presentada en el segundo ciclo en el muro de fibras de PVA a 53,9[mm] de deriva, se consideró los 3 ciclos completos para la comparación de la energía disipada con el muro base, donde se observa un aumento de 37,13% en la energía disipada. Por otro lado, si se compara las energías disipadas totales antes de la falla total del muro, se observa un aumento de 39,69% en el muro de fibras con respecto al muro de hormigón común. Este ligero aumento del porcentaje se debe que, en la última deriva el muro de fibras PVA no alcanzo a completar el primer ciclo sino medio ciclo, por lo tanto, se esperaba un aumento muy leve.

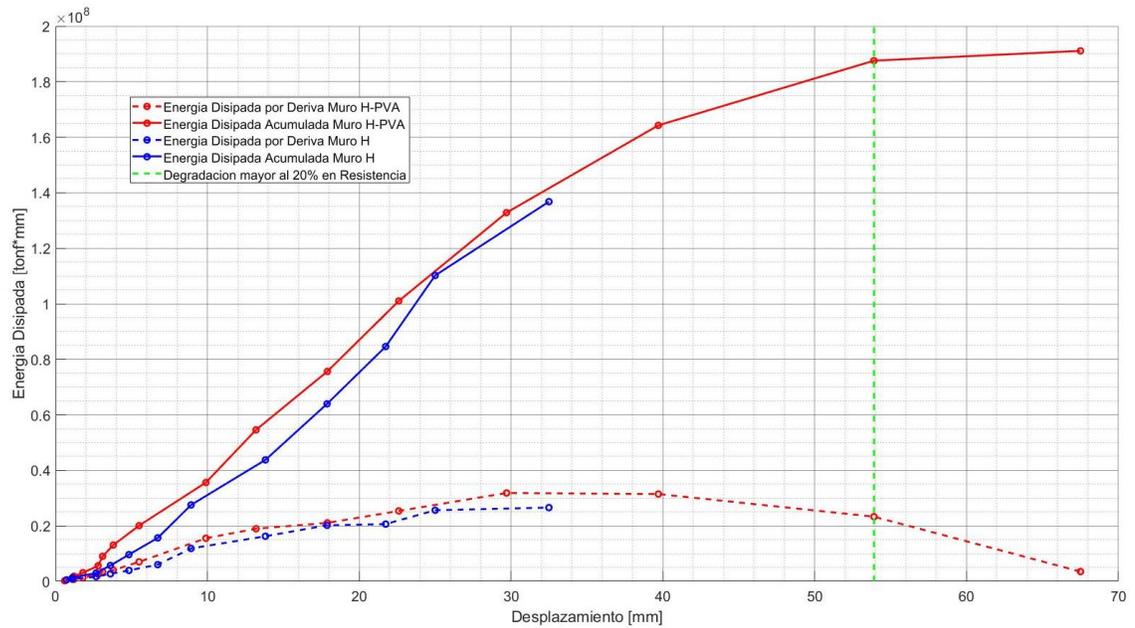


Figura 5.38: Grafico comparativo de disipación de energía.

5.6.4. Modo de falla

Aunque el Muro de hormigón normal y el Muro de hormigón con fibras PVA eran idénticos en cuanto a geometría y armadura, los modos de falla de los muros resultaron completamente distintos. El caso del Muro de hormigón normal, se observó un modo de falla por flexión (Ver Figura 5.39). En muros esbeltos, es común ver grietas diagonales por fallas del tipo flexión.



Figura 5.39: Modo de falla – Muro hormigón normal.

En muros esbeltos, se generan grietas menores a 45° con respecto a la vertical, donde la diagonal principal en la rótula plástica no llega al otro lado del elemento. Se observó durante la ejecución del ensayo, el nacimiento y desarrollo de las grietas, las cuales se abren producto la fuerza lateral en el techo del muro, donde al regresar a su posición inicial, el muro no ejerce resistencia por los que las grietas se cierran. En ese instante, el muro recupera su resistencia y las grietas de flexión opuestas empiezan a visualizarse. A medida que se realizaban ciclos de tracción y compresión, las barras de borde de un lado al momento de comprimirse comenzaron a pandearse. Tras el pandeo local de un lado de las barras longitudinales de borde y el desprendimiento de hormigón en la zona baja del muro, se alcanza la capacidad del muro (Ver Figura 5.40).



Figura 5.40: Pandeo de barras longitudinales de borde - Muro hormigón normal.

Luego de ese suceso, la resistencia comienza a degradarse hasta el punto de desprendimiento en el ancho del muro. Por lo tanto, este modo de falla corresponde a una falla por flexión.

Para el caso del muro de hormigón con fibras PVA, se observó un aumento de grietas superficiales a lo largo de la altura del muro distribuidas cada 10 [cm], sin embargo, se evidenció una mayor concentración de grietas en la zona baja del muro, específicamente horizontales, producto del movimiento fuera del plano creado por una leve desalineación del muro con respecto a la rótula de conexión del actuador horizontal. Estas grietas se aprecian a lo largo del ancho del muro cuando están en tracción. El muro finalmente falla por la rotura de una de las barras longitudinales de borde producida por la fatiga del material sometido a los ciclos de carga del ensayo experimental. (Ver Figura 5.41 y Figura 5.42)



Figura 5.41: Modo de falla – Muro hormigón con fibras PVA.



Figura 5.42: Pandeo de barras longitudinales de borde - Muro hormigón con fibras PVA, Vista Oeste (izquierda) y Este(derecha) del muro.

Las grietas diagonales del muro de hormigón con fibras PVA, no lograron aumentar su espesor en comparación al muro de hormigón normal. Esto se debe al trabajo que realizan las fibras de PVA en recibir las cargas a tracción y, por ende, aumentar el tiempo de compactación de la matriz. de mantener. Para ambos muros presentaron pandeos locales en las mismas zonas, sin embargo, para el caso del muro de hormigón con fibras, este comportamiento se presenta en derivas más altas que el muro convencional. Esto se explica por lo mencionado anteriormente acerca de las propiedades de las fibras. En la Figura 5.43, se puede observar el estado final de ambos muros, en el cual el desprendimiento del muro convencional fue explosivo cuando fallo,

en cambio, para el muro de fibras PVA, el hormigón trata de mantenerse compacto, desprendiéndose de a poco.

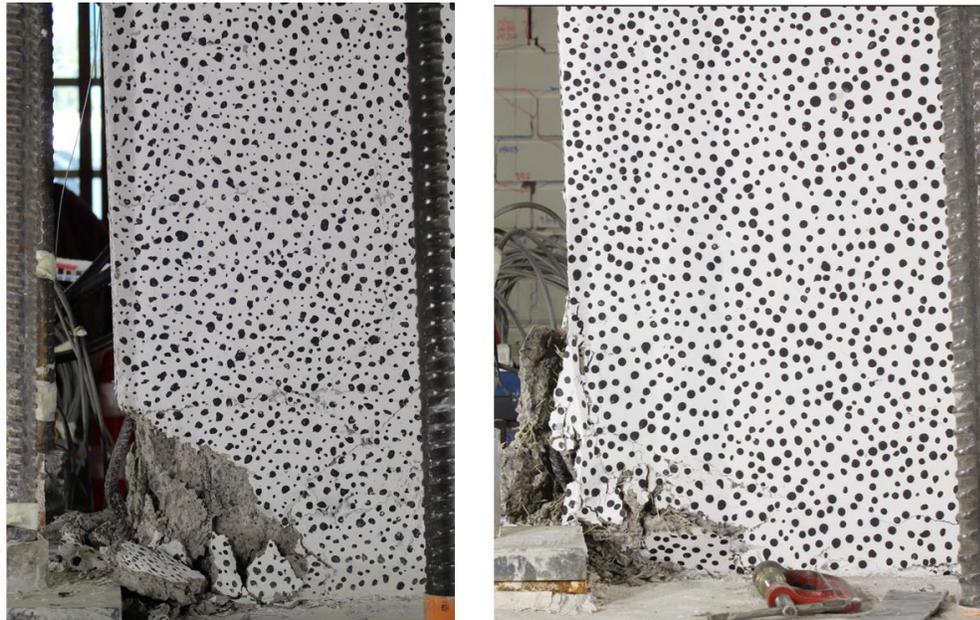


Figura 5.43: Estado final de daño en muro Hormigón normal (izquierda) y Muro de hormigón con fibras de PVA (derecha), lado Este del muro.

5.6.5. Deformaciones unitarias

En las deformaciones unitarias para ambos muros en tracción se utilizó una fórmula de corrección debido a que, al ser fundaciones reutilizables y postensadas, los desplazamientos tanto de la fundación como de la fundación del muro no están a la par, producto de la fricción que se genera entre ambas. Cabe recalcar, que el sensor de la rótula plástica mide el registro del hilo sinfín con respecto a la fundación, por lo tanto, dicho registro de ese sensor debe ser restado por las rotaciones de estos dos elementos. Ante esto, al analizar los registros para el cálculo de las deformaciones unitarias, se observó que no presentaban un dato representativo para realizar un análisis comparativo.

Capítulo 6

Conclusiones

Como se conoce a través de la historia, Chile es una zona de alta actividad sísmica, debido a su ubicación geográfica en la convergencia de dos placas tectónicas principales: la placa de Nazca y la placa Sudamericana, de esta manera, provoca que los diseños en elementos estructurales sean más complejos que otros países. Ante esto, los diseños de muros en el país, deben ser resistentes tanto al corte, como a flexión producto de estas cargas sísmicas para evitar que presente fallas frágiles que puedan generar una falla total en la seguridad de la estructura y, por ende, de las personas. Es por esto, que a medida que se realizan elementos estructurales complejos, el gasto económico del material aumenta. Producto del terremoto del 2010, en Chile, se modificaron las normas, donde se enfatizó el detallamiento de bordes en muros, para evitar que ante un terremoto de igual o mayor magnitud pueda generar fallas totales en las estructuras. Gracias a la evolución de la tecnología en la construcción, se han realizado investigaciones que permitan un aumento en las propiedades del hormigón, para evitar fallas frágiles y posean una mayor ductilidad, donde el uso de las fibras, si bien, se ha hecho desde tiempos antiguos, últimamente, ha sido más recurrente probar distintos materiales como: fibras para observar el beneficio que pueda otorgar en la matriz de cemento, con la finalidad de reducir el costo monetario de los materiales de construcción.

Ante este contexto, el trabajo de memoria de título entrega resultados experimentales el cual consiste en diseñar un muro sin detallamiento de borde, es decir, un bosquejo de muro sin confinamiento (diseño antes del 2010), y comparar un muro de hormigón normal con un muro de hormigón con fibras de PVA, con la finalidad de observar la variación de ductilidad, control de grietas, capacidad y disipación de energía. Además, de analizar, si mediante este método podría visualizarse el uso de estas fibras como reemplazo del acero. Para llevarlo a cabo, se diseñan y construyen dos muros de geometría y armadura idéntica (malla doble), con una relación de aspecto mayor a 2, es decir, un muro con alta esbeltez, donde la diferencia recae particularmente en la composición del hormigón. Sin embargo, comparado con ensayos de muros acoplados, en estos se visualiza una particularidad, la cual es el uso de elementos estructurales (fundaciones y vigas de transferencia), como sujetadores tanto transversalmente en el muro, como a la losa. Este método (fundaciones reutilizables y postensadas), busca una mayor ecología con respecto al hormigón, ya que como se sabe, la fabricación del cemento genera altas emisiones de dióxido de carbono e impacta en la biodiversidad.

Aunque la geometría y la repartición de armadura tanto vertical, como horizontal es la misma para ambos muros, la respuesta global de estos fue distinta. Con respecto al muro de hormigón normal, el ensayo resultó asimétrico producto de un mal ajuste de los sensores críticos en el programa de adquisición de datos, no obstante, en dicho muro, se presentó una falla por flexión, que es característico en muros esbeltos, degradando la resistencia abruptamente. Por otra parte, el muro de hormigón con fibras PVA, presentó una falla por fatiga, dado a la rotura de una de las barras longitudinales, la cual produjo la degradación de resistencia de manera gradual.

Si bien, con relación a la disipación de energía, ambos muros no presentaron mucha diferencia, para observar este comportamiento de mejor manera, se recomienda realizar un modelo que emule dicha energía disipada o en su defecto, se construya otra probeta, para observar el comportamiento de forma empírica.

El muro de hormigón con fibras PVA, presento una resistencia máxima de 11 [tonf], a los 30,80 [mm] en dirección Oeste, un 10% más que en el muro de hormigón normal, lo cual llegó a su resistencia máxima a los 26,72 [mm] en dirección Este. El muro de hormigón normal completó los tres ciclos, con un desplazamiento de techo de 32,49[mm] en dirección negativa (Este). Sin embargo, cuando se le aplicó un desplazamiento mayor, la resistencia bajó abruptamente degradándose en un 79%. No obstante, en el muro de hormigón con fibras PVA, en la dirección negativa, completó solo los dos primeros ciclos de 43,5 [mm] en desplazamiento de techo, donde en el primer y segundo ciclo, presentaron una degradación abrupta, pero no radical del orden de 0,93% y 18,52% respectivamente, producto de la rotura de una barra longitudinal de borde en el primer ciclo y fallando en el tercer ciclo con una degradación del 26,85%. A pesar de eso, el fallo total del muro (paro del ensayo), alcanzo los 61,65 [mm] de desplazamiento de techo, con una degradación de resistencia del 60%. Con respecto, al control de grietas, producto del uso de fibras como refuerzo en el hormigón, las grietas se distribuían de mejor manera que las del muro convencional, donde la tasa de aperturas en las diagonales importantes era menor, por lo que no presentó la fragilidad, que sí posee el hormigón normal.

El muro de hormigón con fibras PVA exhibe un aumento en la ductilidad de 134,18%. Debido a la alta demanda en la deriva en adición a la degradación progresiva de resistencia, el muro de hormigón con fibras PVA, disipa un 37,13% más en comparación al muro de hormigón normal, utilizando el criterio del 20% de degradación de resistencia y un 39,69%, al comparar los ensayos completos (falla total del muro), aunque, si se desea obtener un mejor balance en este factor, es recomendable la construcción del muro de hormigón normal y ensayarlo de manera correcta. Cabe recalcar, que las comparaciones a excepción de la resistencia máxima se realizaron de acuerdo con la dirección negativa (Este) del desplazamiento de techo.

Se ha comprobado, gracias a este trabajo y a las investigaciones anteriores (Marcela Herrera, Alejandro Arenas y Jaime Reveco) que el uso de las fibras de PVA aumenta la ductilidad y controlan el daño de las grietas diagonales. Por otro lado, en términos de capacidad, ante tal cantidad de cuantía de fibras, estas solo aumentaron en un 10%, por lo tanto, no se podría considerar el uso de fibras de PVA como reemplazo del acero, sin embargo, se debe seguir utilizando esta fibra como reforzamiento del acero, en futuros ensayos, por su capacidad en ductilidad y control de grietas.

Con respecto al ensayo de fundaciones reutilizables y postensadas, funcionó correctamente para ambos ensayos, en el cual, tanto las rotaciones como desplazamientos horizontales, presentaban variaciones pequeñas, no obstante, presentaron tipos de fallas distintas: Falla por flexión del tipo compresión (Muro base) y falla por rotura de barras (Muro de fibras PVA).

Capítulo 7

Bibliografía

- [1] Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan (2017), “Design of Concrete Structures” 14th Edition – Chapter 1.1.
- [2] Committe ACI 544 (1996), “State-of-art report on fiber reinforced concrete”, Reapproved 2009 – Chapter 1.
- [3] Bin, M. (2007). “Tensile Behaviour of Concrete with Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber”.
- [4] Arnor Bentur & Sidney Mindess (2006). “Fibre Reinforced Cementitious Composites”.
- [5] Khan, S. U. and Ayub, T. (2016). “Modelling of the pre and post-cracking response of the PVA fibre reinforced concrete subjected to direct tensión”. Construction and Building Materials.
- [6] Linzhu Sun, Qiang Hoa, Junliang Zhao, Dongyan Wu, Fang Yang (2018). “Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression”.
- [7] Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. (2006). “Concrete: Microstructure, properties, and materials”. Mc Graw Hill, 3 Edition – Chapter 11.
- [8] Fan Yu, Daquan Sun, Jue Wang, Minjun Hu (2019) “Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete”.
- [9] ACI 318-14. (2014). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary (ACI 318R-14). American Concrete Institute, 519.
- [10] INN. (2008). NCh 171 Of. 2008. Hormigón - Extracción de muestras del hormigón fresco.
- [11] INN. (2009). NCh 1017 Of. 2009. Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.
- [12] Manríquez, I., “Ensayo de muros bandera de hormigón armado con carga lateral cíclica medido por fotogrametría y comparado con modelo puntal-tensor. tesis para optar al grado de magíster en ingeniería sísmica,” Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 2016.
- [13] Díaz, S., “Estudio experimental y modelamiento en elementos finitos de muros esbeltos de hormigón armado con discontinuidades tipo bandera. tesis para optar al grado de magister, mención ingeniería sísmica,” Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, 2016.
- [14] Wallace, J. W., & Massone, L. (2004). Load-Deformation Response of Slender Reinforced Concrete Walls.

[15] 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.

[16] 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).

[17] 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.

ANEXOS

ANEXO A

Planos de placas de acero

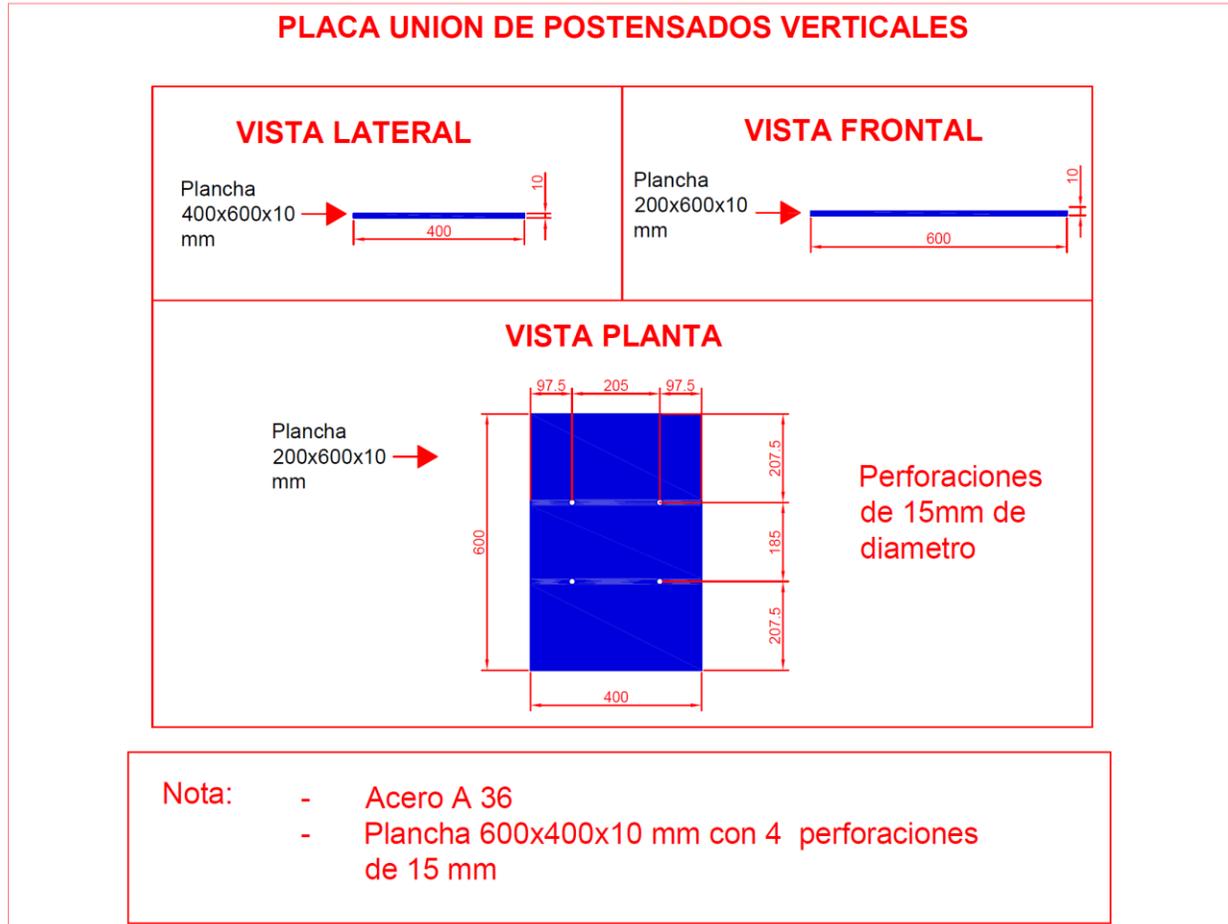
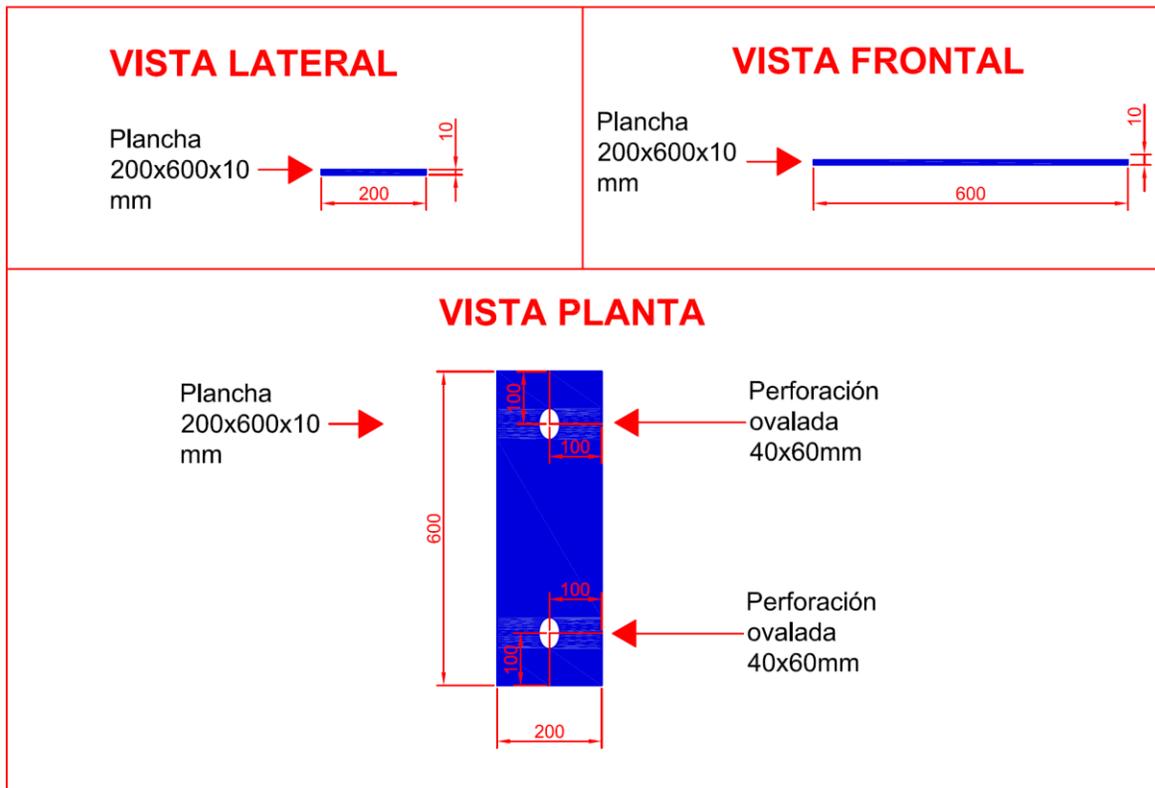


Figura 7.1: Plano de plancha de acero para sistema de carga axial.



Nota:

- Acero A 36
- 2 Planchas 600x200x10 mm con perforaciones ovaladas de 60x40 mm

Figura 7.2: Plano de plancha de acero para postensado vertical a losa de laboratorio.

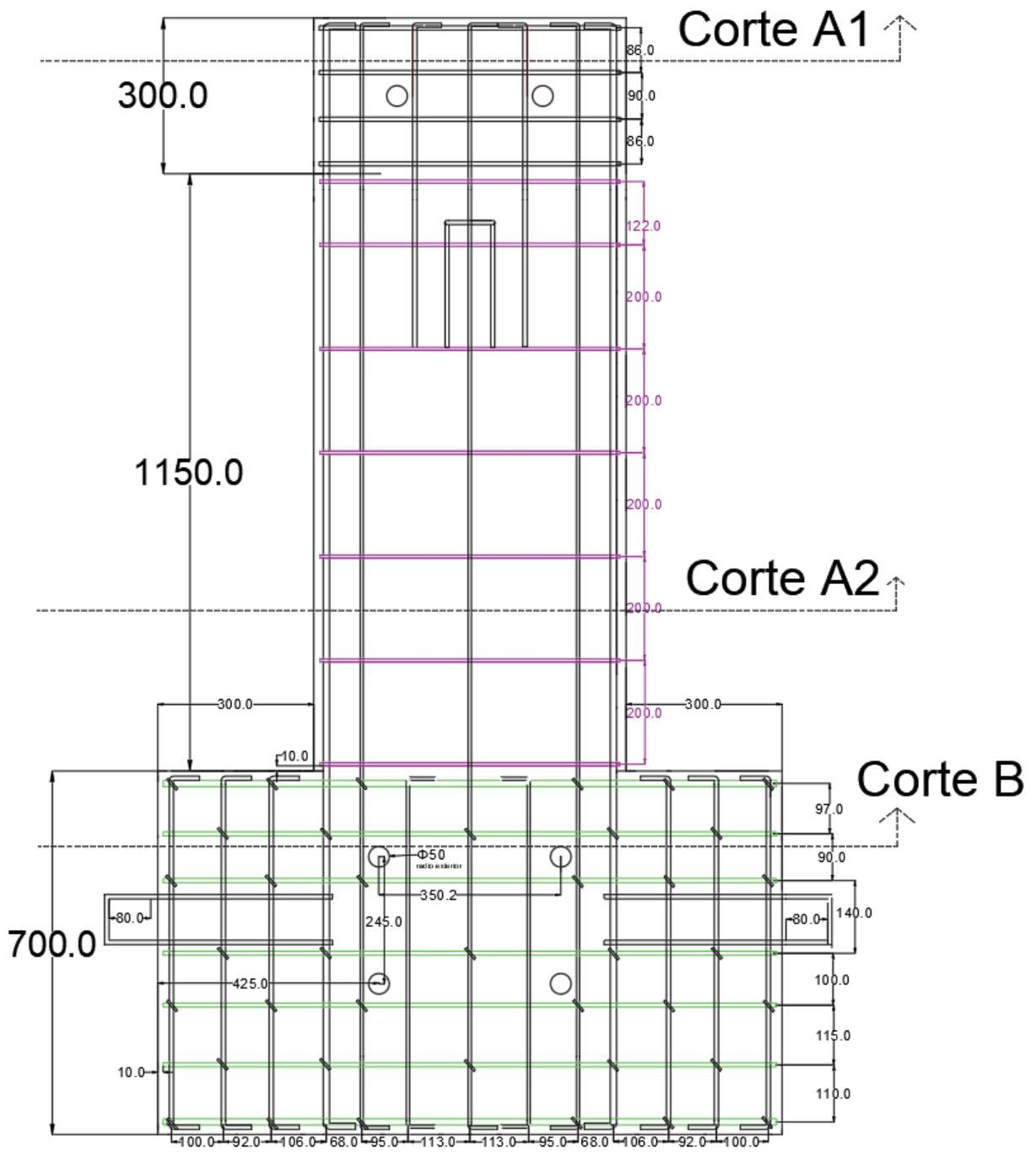
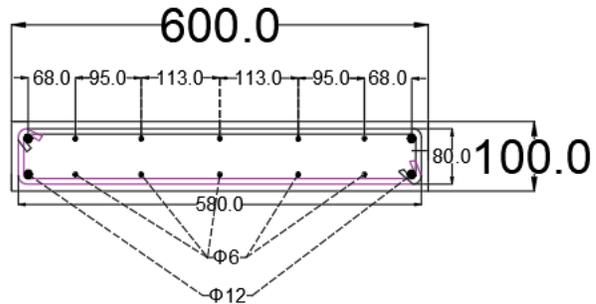
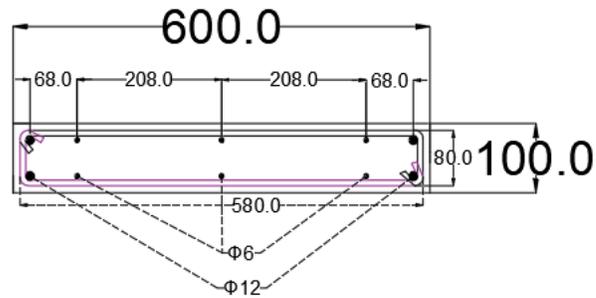


Figura 7.3: Plano de armadura para ambos muros (medidas en [mm])

Corte A1



Corte A2



Corte B

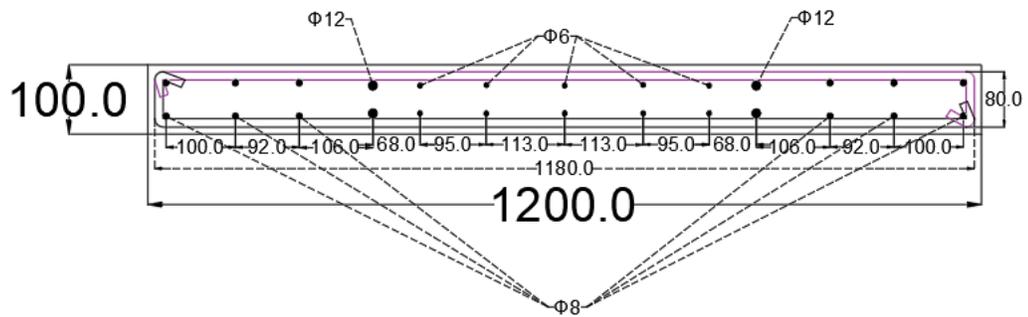


Figura 7.4: Plano de armadura para ambos muros (medidas en [mm]) - Vista en Planta.