



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

REHABILITACIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CON MORTERO  
REFORZADO CON MALLA DE FIBRA DE VIDRIO

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
OMAR EDGARDO GONZALEZ PARRA

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO AGOSTO 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por todo el cariño y apoyo que me brindaron a lo largo de los años, especialmente a mis padres, que han trabajado todos los días de su vida para poder darme las oportunidades que ellos no tuvieron sin importar los sacrificios que tuvieron que hacer.

A mis amigos, por todos los momentos que compartimos durante estos dos años, en especial a Oscar y Juan Carlos, por toda su ayuda y el haberse tomado la molestia de compartir sus conocimientos conmigo.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por el asesoramiento de este trabajo y el apoyo brindado durante el tiempo que forme parte de su equipo de investigación.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto.

Al proyecto Fordecyt No. 297246 y al Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro, líder del proyecto, por su apoyo.

Al Dr. Juan José Pérez Gavilán por proporcionar datos para la elaboración del proyecto y los especímenes utilizados en las pruebas experimentales.

A la empresa SIKA por la donación de la rehabilitación de los especímenes ensayados en este proyecto, que incluyó materiales y mano de obra.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por brindar las facilidades para realizar las pruebas de un muro rehabilitado.

A mis sinodales que se tomaron el tiempo de revisar esta tesis.

## RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de un estudio experimental sobre una técnica de rehabilitación que consiste en encamisado parcial de muros de mampostería con mortero reforzado con malla de fibra de vidrio. Se ensayó un modelo aislado de muro en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y un modelo de edificio de mampostería de tres niveles, a escala 1:2, en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Inicialmente, los modelos del muro y del edificio se sometieron a pruebas para llevarlos a un estado de daño considerable. Después, éstos se rehabilitaron con la técnica descrita y se ensayaron nuevamente.

Se presentan algunos resultados de interés ingenieril. Se comparan distorsiones de entrepiso, cortante basal, amortiguamiento, evolución del periodo de la estructura a lo largo de cada prueba, intensidad sísmica, y la resistencia ante cargas laterales. Se analiza y discute la efectividad de la técnica de rehabilitación utilizada en este estudio.

## **ABSTRACT**

This work presents results of an experimental study on a rehabilitation technique, which consists of partial reinforcement of masonry walls with mortar reinforced with a fiberglass mesh. An isolated wall model was tested at the National Center for Disaster Prevention (CENAPRED) and a three-story masonry building model, at a scale of 1:2 on a shaking table, at the Institute of Engineering of the National Autonomous University of Mexico (UNAM).

Initially, the wall and building models were tested to achieve a state of moderate damage. Afterwards, these specimens were rehabilitated with the above mentioned technique. Then, they were retested.

Results are presented and discussed, including the comparison of inter-story drift ratios, base shear, damping, evolution of the structural period after each test, seismic intensity, and lateral load resistance. The effectiveness of the rehabilitation technique, assessed in this study, is analyzed and discussed.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Planteamiento del problema.....	11
1.2. Justificación y alcances de la investigación .....	11
1.3. Objetivos .....	12
1.4. Contenido de la tesis.....	12
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....	13
2.1. Tipos de falla en estructuras de mampostería .....	13
2.2. Técnicas de rehabilitación .....	13
2.2.1. Reparación de grietas por medio de inyección .....	14
2.2.2. Remplazo de piezas y concreto dañados.....	15
2.2.3. Inserción de barras de refuerzo .....	16
2.2.4. Conexiones mampostería-acero .....	16
2.2.5. Encamisado de muros .....	17
2.3. Tipos de fibras .....	17
2.4. Encamisado de muros de mampostería con fibra de vidrio .....	18
CAPÍTULO 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	21
3.1. Descripción de la técnica de encamisado de muros con malla de fibra de vidrio.....	21
3.2. Pruebas en muro aislado.....	27
3.2.1. Geometría.....	27
3.2.2. Instrumentación .....	29
3.2.3. Protocolo de carga.....	31
3.3. Pruebas en mesa vibradora de modelo de edificio .....	31
3.3.1. Geometría del modelo de edificio.....	31
3.3.2. Instrumentación .....	37
3.3.3. Movimiento en la base.....	39
3.3.4. Programa de pruebas.....	39
3.4. Proceso de rehabilitación del segundo nivel del modelo de edificio.....	40
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	41
4.1. Ensaye de muestras .....	41
4.1.1. Pilas.....	41

4.1.2. Muretes.....	44
4.1.3. Cilindros.....	47
4.1.4. Cubos.....	49
4.1.5. Ensaye de malla SikaWrap - 350G Grid.....	50
4.2. Resultados del ensaye del muro aislado .....	51
4.2.1. Predicción de la resistencia de los modelos a fuerza cortante .....	51
4.2.2. Modos de falla en el muro aislado.....	56
4.2.3. Relaciones carga-desplazamiento y envolventes (muro aislado).....	58
4.2.4. Comparación de curvas de histéresis y sus envolventes.....	60
4.3. Resultados del ensaye en mesa vibradora .....	61
4.3.1. Modos de falla de la estructura .....	61
4.3.2. Relaciones carga-desplazamiento y envolventes (modelo edificio) .....	63
4.3.3 Funciones de transferencia y propiedades dinámicas.....	65
4.3.4. Amortiguamiento calculado por equilibrio energético .....	68
4.3.5. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso y desplazamiento relativo máximo.....	68
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....</b>	<b>73</b>
Después de presentar los resultados en esta tesis, se ofrece la siguiente discusión: .....	73
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>74</b>
5.1. Conclusiones .....	74
5.2. Recomendaciones .....	75
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>76</b>
<b>APÉNDICE A. Ficha técnica del mortero de rehabilitación.....</b>	<b>77</b>
<b>APÉNDICE B. Ficha técnica de la malla de fibra de vidrio.....</b>	<b>78</b>
<b>APÉNDICE C. Bitácoras de pruebas original y rehabilitado .....</b>	<b>80</b>
<b>APÉNDICE D. Precios unitarios de refuerzo con malla de alambre soldado y malla de fibra de vidrio .....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de falla en muros mampostería (Páez et al., 2009).....	13
Figura 2. Reparación de grietas en muros de mampostería por medio de inyección.....	15
Figura 3. Inserción de barras de refuerzo en muro de mampostería .....	16
Figura 4. Encamisado parcial en muro de mampostería.....	17
Figura 5. Modelo de edificio después del primer ensaye .....	<del>21</del> 22
Figura 6. Preparación de superficie de muros para recibir encamisado .....	22
Figura 7. Muros reparados mediante rajuelas, sustitución de piezas, y remplazo de concreto en castillos .....	23
Figura 8. Aplicación de la primera capa de mortero en muro.....	24
Figura 9. Colocación de malla de fibra de vidrio en muro .....	25
Figura 10. Aplicación de la segunda capa de mortero en muro.....	26
Figura 11. Geometría del muro.....	27
Figura 12. Modelo M1-crR antes de ensayarse .....	28
Figura 13. Detalle tipo de castillo y dala de cerramiento.....	28
Figura 14. Instrumentación externa del muro.....	29
Figura 15. Instrumentación interna del muro .....	29
Figura 16. Protocolo de carga para muro aislado .....	31
Figura 17. Geometría del modelo de edificio .....	32
Figura 18. Modelo de edificio antes de ensayarse.....	33
Figura 19. Armado de castillos y dalas (Edificio 3 niveles) .....	34
Figura 20. Armado de losas del edificio .....	35
Figura 21. Ubicación de lingotes de plomo y dinamómetros en el modelo del edificio .....	36
Figura 22. Instrumentación externa del modelo (Edificio 3 niveles) .....	37
Figura 23. Instrumentación interna del modelo del edificio .....	38
Figura 24. Acelerograma sintético utilizado para pruebas en mesa vibradora.....	39
Figura 25. Espectro de respuesta objetivo .....	39
Figura 26. Proceso de rehabilitación de muros del segundo nivel del edificio.....	40
Figura 27. Segundo nivel rehabilitado del modelo del edificio.....	40
Figura 28. Ensaye de pilas .....	43
Figura 29. Ensaye de muretes .....	46
Figura 30. Ensaye de cilindros del motero de rehabilitación a compresión axial .....	47
Figura 31. Ensaye de cilindros de concreto utilizados en cimentación y losas a compresión axial.....	48
Figura 32. Ensaye de cubos .....	49
Figura 33. Modo de falla del modelo M1-cr.....	56
Figura 34. Modo de falla del modelo M1-crR.....	57



<b>Figura 35. Desprendimiento del encamisado en modelo M1-crR .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 36. Curva de histéresis del modelo M1-cr.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 37. Curva de histéresis del modelo M1-crR.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 38. Curvas de histéresis del modelo M1-cr y M1-crR.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 39. Envoltentes del modelo M1-cr y M1-crR.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 40. Modo de falla del modelo original .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 41. Modo de falla del modelo rehabilitado .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 42. Daño en extremo inferior de los castillos .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 43. Curva de histéresis del modelo original (N1) .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 44. Curva de histéresis del modelo original (Azotea).....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 45. Curva de histéresis del modelo rehabilitado (N1).....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 46. Curva de histéresis del modelo rehabilitado (Azotea).....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 47. Función de transferencia Azotea/base .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 48. Variación del periodo respecto a la intensidad sísmica.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 49. Variación del amortiguamiento respecto a la aceleración máxima en la base .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 50. Perfiles de desplazamiento máximo relativo en modelo original.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 51. Perfiles de desplazamiento máximo relativo en modelo rehabilitado .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 52. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso en modelo original .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 53. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso en modelo rehabilitado .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura A1. Ficha técnica de mortero Sika MonoTop – 722 Mur .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura B1. Ficha técnica de malla de fibra de vidrio SikaWrap – 350 G Grid .....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las propiedades de las fibras y el acero de refuerzo (Fancher, 1997)..	18
Tabla 2. Descripción de instrumentación en muro M1-crR.....	30
Tabla 3. Carga adicional asignado por tensado de cable.....	35
Tabla 4. Resultados experimentales de pilas de mampostería sin refuerzo .....	41
Tabla 5. Factor correctivo por esbeltez.....	42
Tabla 6. Resultados experimentales de pilas con refuerzo .....	43
Tabla 7. Factor correctivo por esbeltez.....	44
Tabla 8. Resultados experimentales de muretes sin refuerzo.....	44
Tabla 9. Resultados experimentales de muretes.....	46
Tabla 10. Resultados experimentales de cilindros.....	48
Tabla 11. Resultados experimentales de cilindros de concreto utilizado en la cimentación.....	48
Tabla 12. Resultados experimentales de cilindros de concreto utilizado en la losa del primer nivel .....	49
Tabla 13. Resultados experimentales de cilindros de la losa del segundo nivel.....	49
Tabla 14. Resultados experimentales de cilindros de la losa del tercer nivel.....	49
Tabla 15. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el primer nivel .....	50
Tabla 16. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el segundo nivel.....	50
Tabla 17. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el tercer nivel.....	50
Tabla 18. Resumen de resultados de modelo original.....	71
Tabla 19. Resumen de resultados de modelo rehabilitado .....	71
Tabla C1. Bitácora de prueba modelo original .....	80
Tabla C2. Bitácora de prueba modelo rehabilitado.....	80
Tabla D1. Precio unitario del refuerzo con malla de alambre soldado .....	82
Tabla D2. Precio unitario del refuerzo con malla de fibra de vidrio.....	83



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Planteamiento del problema

Al pasar el tiempo, mientras más se han presentado sismos a lo largo de la historia, la sociedad ha ido aprendiendo cada vez más de ellos para poder prevenir desastres como los ocurridos el 19 de septiembre de 1985 y 2017. Esto se ve reflejado en los nuevos reglamentos que se han actualizado producto de la investigación que se ha realizado. Las normas actuales están pensadas en evitar el colapso, aunque permiten que se desarrolle cierto nivel de daño, con base en la experiencia obtenida en los últimos años, se ha tomado más importancia a la investigación de nuevas técnicas de rehabilitación las cuales ayudan a mejorar el comportamiento de las estructuras ante sismos futuros.

En las últimas décadas ha crecido el interés en utilizar fibras para remplazar los materiales convencionales utilizados en el fortalecimiento o en la rehabilitación de estructuras del concreto reforzado. Una de las fibras más conocidas es la fibra de vidrio, la cual ofrece una alternativa interesante como material de refuerzo debido a su bajo peso específico, alto módulo de elasticidad y alta resistencia a la tracción.

El uso de la fibra de vidrio, como una solución al reforzamiento de las estructuras, no ha sido implementado frecuentemente debido a la falta de estudios sobre esta técnica. Con base en ello, en este trabajo de investigación se estudia el comportamiento experimental de la técnica.

## 1.2. Justificación y alcances de la investigación

En los últimos años, ha crecido el interés por investigar nuevas técnicas de rehabilitación que puedan mejorar el comportamiento de estructuras existentes, ya sea porque han sufrido daños debido a los recientes eventos sísmicos que han ocurrido (como el 19 de septiembre del 2017), porque no se satisface con el reglamento vigente o simplemente por el deseo del propietario para mejorar su desempeño.

La Ciudad de México no es el único lugar en el país donde los edificios son sometidos a acciones sísmicas severas. Existen otros lugares del país como el estado de Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Chiapas y Puebla en donde los edificios pueden llegar a experimentar fuerzas cortantes muy elevadas, las cuales ponen en riesgo tanto la integridad de la estructura como la de sus ocupantes. Para edificios, es conveniente utilizar sistemas de muros en lugar de marcos para así mejorar el comportamiento de la estructura ante cargas laterales y reducir la demanda de desplazamientos.

Ante eventos de magnitud considerable, en ocasiones es inevitable que la estructura sufra algún tipo de daño. Esto ocurre porque la normativa vigente permite daño ante sismos intensos. El único requisito es evitar el colapso de las estructuras. Es por esto que los métodos de rehabilitación juegan un papel muy importante en la práctica hoy en día.

Como se mencionó, el trabajo consiste en evaluar la técnica de rehabilitación de muros a base de mortero reforzado con fibra de vidrio. El trabajo se limita a una investigación experimental de un modelo de muro aislado y un edificio de tres niveles. Se compara el comportamiento antes y después de la rehabilitación. El alcance de este trabajo es analizar la técnica de rehabilitación a base de mortero con malla de fibra de vidrio para rehabilitar muros de mampostería.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo general de esta tesis es comparar el comportamiento experimental de estructuras de mampostería antes y después de ser rehabilitadas con mortero reforzado con malla de fibra de vidrio.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Realizar pruebas experimentales de un muro aislado y de un modelo edificio de tres niveles, ambos a escala 1:2.
- Con base en los resultados, evaluar el comportamiento del muro y del modelo de edificio para comprender la efectividad de la técnica de rehabilitación.
- Sentar bases sólidas para poder continuar con la investigación.

### **1.4. Contenido de la tesis**

En la presente tesis, se analiza la efectividad del encamisado parcial con mortero reforzado con malla de fibra de vidrio como técnica de rehabilitación en muros de mampostería mediante pruebas experimentales, se hace una comparación de los resultados experimentales antes y después de la rehabilitación y se discuten los resultados obtenidos.

El capítulo 1 presenta la problemática a estudiar. Se discute sobre la necesidad de estudiar nuevos materiales como solución en el reforzamiento de estructuras de mampostería y las actividades planteadas con el fin de alcanzar los objetivos propuestos.

El capítulo 2 es un resumen de la literatura consultada relacionada con el tema de investigación como tipos de falla en estructuras de mampostería, propiedades de la fibra de vidrio y proceso general de rehabilitación con fibra de vidrio.

En el capítulo 3 se presenta una descripción de las pruebas experimentales. Se presenta, la geometría de los modelos, la instrumentación, el protocolo de carga utilizada en las pruebas de muro aislado y el programa de pruebas de las pruebas en mesa vibradora.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos en las pruebas, como tipos de falla presentes en los modelos, relaciones carga-desplazamiento, envolventes, perfiles de deformación y algunos otros resultados de interés ingenieril. Finalmente, en el capítulo 5 se discuten los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y se ofrecen conclusiones de este trabajo.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Tipos de falla en estructuras de mampostería

Los mecanismos de falla de un muro de mampostería dependen principalmente de las características mecánicas de los materiales que conforman la mampostería (ladrillos y mortero), así como de la relación de aspecto del muro (altura/longitud) (Gómez et al., 2019). Tales mecanismos se pueden clasificar en tres (Páez et al., 2009): falla por deslizamiento, falla por tensión diagonal y falla por flexión. En la Figura 1 se muestran los mecanismos de falla más comunes en la mampostería.

La falla por deslizamiento se presenta a lo largo de la junta horizontal del mortero, como consecuencia de una falla de adherencia por corte en la junta, ocasionado por un cortante basal elevado y por la poca adhesión entre las piezas y el mortero.

El agrietamiento por fuerza cortante se puede presentar como grietas inclinadas que atraviesan las piezas o en forma escalonada siguiendo la junta de mortero, caracterizada por su diagonal a lo largo del muro y es consecuencia de las tensiones de tracción diagonal o esfuerzos de corte que se producen en el mismo.

La falla por flexión se presenta en muros esbeltos con grietas verticales en las esquinas y en el centro producida por una falla de compresión por flexión en el talón comprimido del muro.

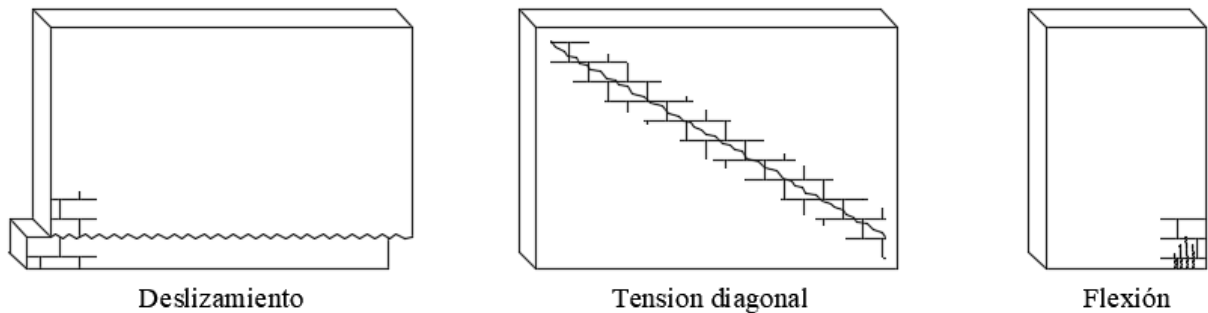


Figura 1. Mecanismos de falla en muros mampostería (Páez et al., 2009).

### 2.2. Técnicas de rehabilitación

El objetivo de las técnicas de rehabilitación empleadas para restaurar estructuras después de haber ocurrido un evento sísmico que haya ocasionado daños, es el de mejorar el comportamiento estructural de los elementos dañados. También se pueden ejecutar en estructuras no dañadas como anticipación de futura actividad sísmica con el fin de mantener la funcionalidad de la estructura (Soto, 2008).

Algunos de los factores que intervienen en la elección de la técnica de rehabilitación son las siguientes (Soto, 2008):

- Objetivos del diseño
- Duración del trabajo
- Funcionalidad y estética compatibles con el edificio existente
- Control de calidad
- Compatibilidad estructural con el sistema del edificio existente
- Irregularidades de rigidez, resistencia y ductilidad
- Capacidad de la cimentación
- Disponibilidad de la tecnología y materiales de reparación
- Disponibilidad de mano de obra

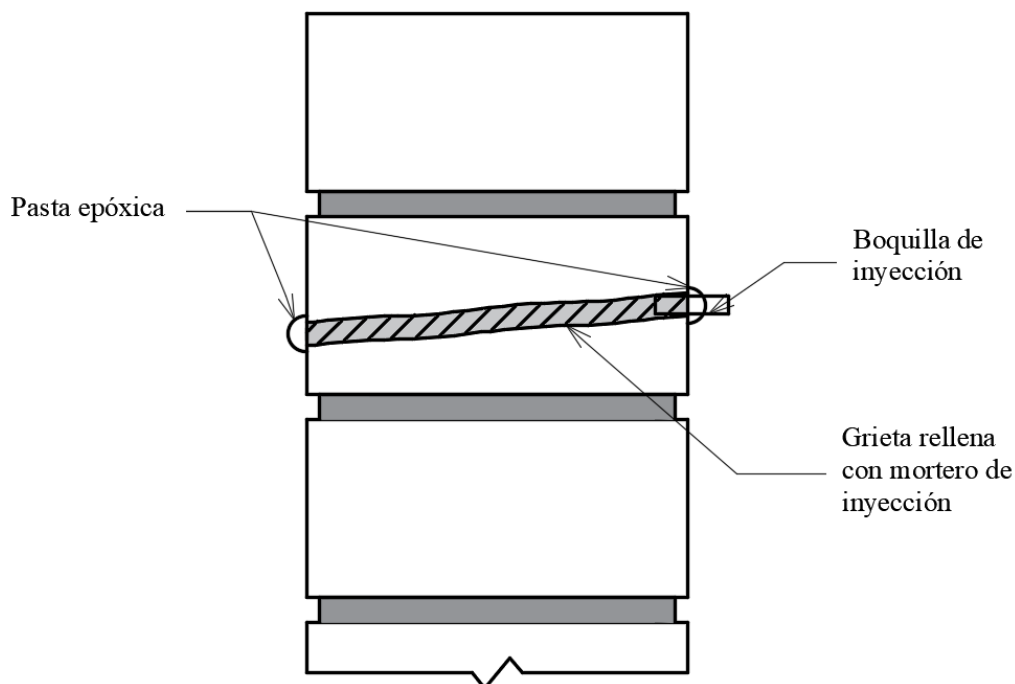
A continuación, se describen algunas de las técnicas que se encuentran en el libro de Edificaciones de Mampostería, editado por Gómez et al., (2019). Se recomienda al lector ir al libro para más información acerca de las técnicas de rehabilitación.

### **2.2.1. Reparación de grietas por medio de inyección**

La declaración obvia de daño en un muro de mampostería, es el agrietamiento de la misma. La técnica de reparación consiste en cerrarlas o rellenarlas. Hay de dos tipos de reparación, por inyección o con rajuelas.

La reparación de grietas por medio de la inyección consiste en rellenar las grietas mediante resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento. Esta técnica es aplicable para muros de mampostería de piezas sólidas, con un bajo número de grietas que estén bien definidas y con un tamaño no mayor a 5 mm.

Primero, se limpian las grietas retirando el polvo y material suelto o flojo. Es conveniente utilizar aspiradora industrial. Después, se sellan las grietas y se colocan las boquillas de inyección. Se realiza inyectando la resina de abajo hacia arriba a lo largo de la grieta. Se considera que el proceso de inyección es satisfactorio cuando la resina sale por la boquilla superior. En la Figura 2, se puede ver el esquema general de la rehabilitación por inyección (Gómez et al., 2019).



**Figura 2. Reparación de grietas en muros de mampostería por medio de inyección**

Cuando la grieta tiene un espesor mayor a 5 mm, es recomendable reparar la fisura por medio de rajuelas. Esto consiste en insertar piezas en las grietas del muro con el propósito de llenarlas, estas deben acuñaarse y pegarse con mortero tipo 1.

### **2.2.2. Remplazo de piezas y concreto dañados**

Esta técnica se aplica generalmente en muros con zonas muy dañadas. La eficiencia de esta depende de la calidad de la ejecución. Para la correcta sustitución de las piezas es necesario apuntalar y re nivelar la estructura, sobre todo si se dañaron los elementos confinantes del muro, ya que los castillos contribuyen a la capacidad de desplazamiento lateral de la estructura (Alcocer, 1997). Otro aspecto importante es el uso de morteros o concretos con aditivos estabilizadores de volumen, esto para disminuir la contracción por fraguado y evitar la aparición de nuevas fisuras.

Al utilizar esta técnica de rehabilitación se deberá tener cuidado con los materiales. Como regla básica se usan materiales del mismo tipo a la del original con una resistencia igual o mayor. Es común que se aproveche la reparación para mejorar el comportamiento de la estructura ante eventos sísmicos futuros, por lo que se utilizaran materiales con propiedades mecánicas superiores a las originales, aunque hay que tener en cuenta que la adición de piezas con propiedades muy diferentes a la original, puede desencadenar concentraciones de esfuerzos que dañan a la estructura, como los morteros que presenten cambios volumétricos muy diferentes a la de la mampostería.

Tanto la reparación de grietas por inyección, como el remplazo de piezas se pueden utilizar en combinación con alguna otra de las técnicas presentadas en las siguientes secciones.



### 2.2.3. Inserción de barras de refuerzo

Esta técnica consiste en colocar barras de refuerzo a lo largo de las juntas de mortero. Para alojarlas se requiere preparar la junta con ranuras longitudinales y practicar barrenos transversales al muro a ciertos intervalos para amarrar las barras entre sí. Habiendo colocado el refuerzo horizontal, este se recubre con un mortero de cemento tipo epóxico, las barras se deben anclar en los extremos de los muros, por medio de ganchos a 90° en los elementos confinantes. Si bien con esta técnica se puede recuperar un nivel de resistencia, rigidez y capacidad de deformación aceptables, esto dependerá de la calidad de la ejecución. En la Figura 3 se puede ver un esquema general de la rehabilitación por inserción de barras de refuerzo (Gómez et al., 2019).

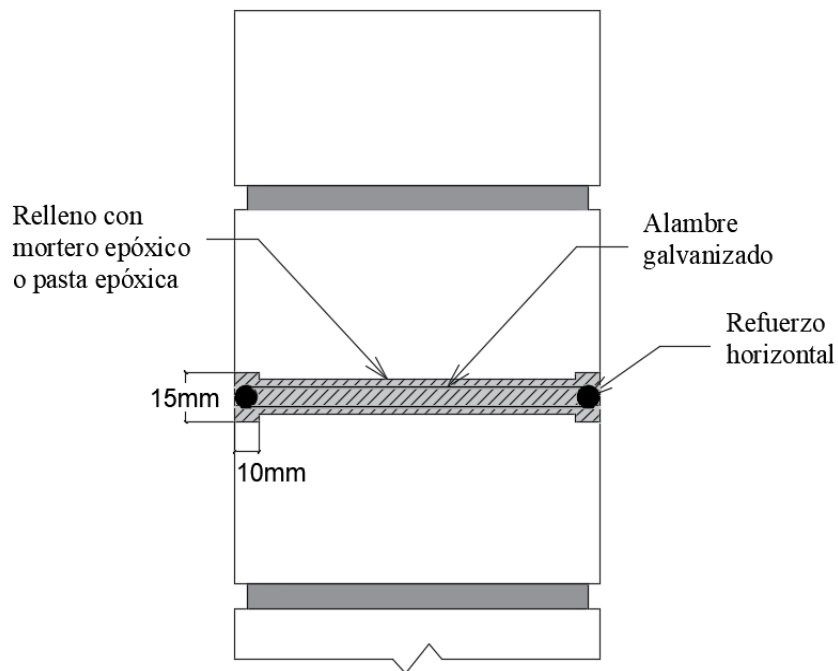


Figura 3. Inserción de barras de refuerzo en muro de mampostería

### 2.2.4. Conexiones mampostería-acero

La adición de elementos de acero a la mampostería consiste en mejorar el comportamiento de la mampostería mediante elementos de acero usando conectores o anclas para facilitar la conexión entre ambos materiales. La conexión puede postensarse, de modo que la carga se transmita por fricción en la interface mampostería acero.

El método más popular para conectar elementos de acero a la mampostería es el de conectores roscados, instalados en barrenos con algún tipo de resina. Para mejorar la resistencia y rigidez de la conexión, es recomendable aplicar resina en la cara del elemento de acero en contacto con la mampostería, así como en el espacio anular que queda entre el perno y el agujero en el acero.

### 2.2.5. Encamisado de muros

El encamisado de muros consiste en agregar una capa de concreto, mortero u otro material similar, reforzado con barras de acero convencional, mallas metálicas o con fibras con el fin de aumentar la sección transversal del elemento

La efectividad de la técnica depende de que el material original y el de refuerzo tengan un comportamiento monolítico. Para eso se debe tratar la superficie de contacto antes de colocar la malla y el mortero. Se retira el recubrimiento del muro, se limpia el polvo y las partículas interiores en las grietas por medio de chorros de agua. La malla se fija directamente sobre la cara del muro con clavos tipo Hilti X-ZF o similares, con una separación de 450 mm. Si las piezas son de mala calidad, se deben colocar a una separación máxima de 250 mm. En la Figura 4 se muestra un esquema general de la técnica de encamisado de muros.

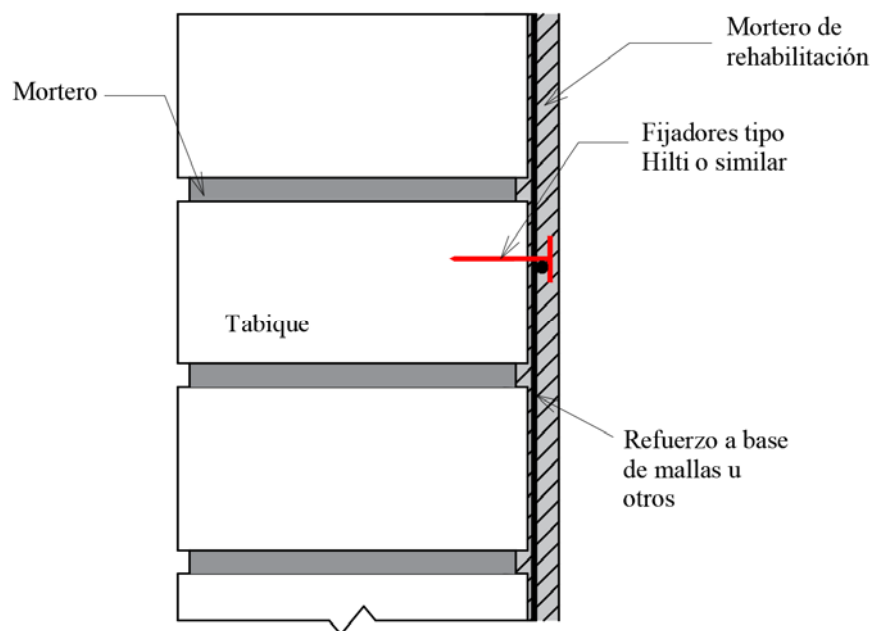


Figura 4. Encamisado parcial en muro de mampostería

### 2.3. Tipos de fibras

Un método interesante es el encamisado con fibras, que consisten en reforzar utilizando su capacidad de carga a tensión, sustituyendo así la función del acero convencional en el concreto reforzado.

Existen varios tipos de fibras que pueden ser utilizadas en la rehabilitación de estructuras, entre ellas están la fibra de vidrio, carbono o aramid y estas se describen a continuación:

- Fibra de vidrio: Es la más utilizada por el bajo costo, su alta resistencia y capacidad de deformación. La desventaja de esta fibra es su bajo módulo de elasticidad y la poca adherencia en la mezcla principalmente por la humedad.
- Fibra de aramid. Mejor conocidas por su nombre comercial “kevlar”, tienen alta resistencia, bajo peso y alta resistencia al impacto. De las tres es la menos utilizada.

- Fibra de carbono. Tienen propiedades mecánicas y resistencia al ambiente ideales para el uso externo en rehabilitación estructural, aunque su resistencia a tensión no es mayor que la de las fibras de vidrio.

En la Tabla 1 se presentan algunas propiedades de interés de las fibras. Se pueden deducir las ventajas de las fibras sobre las placas de acero con sus altas relaciones de resistencia/peso y rigidez/peso.

**Tabla 1. Comparación de las propiedades de las fibras y el acero de refuerzo (Fancher, 1997)**

Parámetro	Fibra de vidrio	Aramid	Carbón de alta resistencia	Acero grado 40
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2540	1450	1800	7850
Resistencia a la tensión (MPa)	3450	3620	3800	620
Rigidez a tensión (GPa)	72.4	131	227	200
Deformación a la falla (%)	4.8	2.8	1.7	12

#### 2.4. Encamisado de muros de mampostería con fibra de vidrio

La mampostería puede rehabilitarse con encamisados de morteros o cemento reforzado con fibras. Este método es probablemente la mejor técnica de rehabilitación por su desempeño, así como por su bajo costo.

Existe muy poca información sobre el mortero con fibra de vidrio utilizado como un material para la rehabilitación de estructuras, aunque ya se ha hecho investigación en algunas partes del mundo sobre el comportamiento de la fibra de vidrio como material para la construcción.

La aplicación del mortero con fibras en el encamisado de muros de mampostería, ha mostrado un incremento en la capacidad de deformación y una reducción a la degradación de rigidez a los elementos confinantes en comparación con los especímenes de control (Shaheen y Shrive, 2007).

También se ha observado una mejora en el comportamiento fuera del plano, obteniéndose incrementos en la resistencia de hasta siete veces comparando con muros sin encamisar (Haddad et al., 2010)

Respecto a técnicas de rehabilitación, en China se hicieron investigaciones en marcos reforzados de concreto, encamisados con polímero reforzado con fibra de carbono (Chen et al., 2019). Se ensayaron 2 marcos a escala 1:2, con dos crujiás y 2 niveles bajo carga axial cíclica, uno de los marcos se encamiso con polímero de fibra de carbono en las articulaciones y el otro sirvió como modelo de control (modelo sin reforzamiento). Los resultados indicaron que el modelo con refuerzo aumento su resistencia lateral un 20% y disipo energía 3.01 veces más que el modelo de control.

En Italia, se realizaron pruebas para estudiar el comportamiento dinámico de los morteros reforzados con fibra de vidrio y basalto (Fenu et al., 2016). Se llevaron a cabo pruebas dinámicas por medio de una barra de Hopkins para analizar la influencia de las fibras en la absorción de energía, los resultados mostraron que al agregar 5% de fibra de vidrio el mortero pudo disipar 7.2% veces más energía que el mortero original y con 3% de fibra disipo 4.6 veces más energía, mientras que con la fibra de basalto con 5% de fibras este disipo 2.2% y con 3% de fibras prácticamente disipo la misma energía que el mortero original.

Como se mencionó anteriormente, en la literatura hay mucha información sobre el comportamiento de la fibra de vidrio, en India (Kasagani y Rao, 2018) realizaron estudios sobre la influencia del tamaño de

la fibra en la resistencia a tensión del concreto reforzado con fibra. Se hicieron pruebas de tensión uniaxial hasta llegar a la ruptura en cilindros con diferentes porcentajes de fibras de vidrio, se utilizaron cilindros con distintas graduaciones de fibras y con un solo tamaño de fibra de vidrio, de los resultados muestran que la resistencia y la capacidad de deformación son más favorables para concreto reforzado con fibra de vidrio graduado con diferentes tamaños que con el concreto reforzado con un solo tamaño de fibra.

En Australia, se ensayaron especímenes de concreto para estudiar la influencia del incremento de la resistencia a corte de elementos de concreto reforzados con fibras (Khanlou et al., 2013). Los ensayos llevados a cabo muestran que para cambiar el modo de falla sólo se necesita agregar 20 kg de fibras por cada metro cúbico de concreto. Sin embargo, se demostró que existe un incremento en la resistencia a cortante del concreto cuando se emplea una dosificación de 40 kg de fibras por cada metro cúbico de concreto. El incremento de la resistencia a corte del concreto puede llegar a tener hasta un 70% de aumento cuando se utiliza una dosificación de 80 kg de fibra por cada metro cúbico de concreto. Con base en los resultados experimentales se pudo hacer un análisis de regresión para determinar una ecuación que permita calcular el incremento de la resistencia a cortante. Esta ecuación se compone por la componente del concreto puro  $0.75\sqrt{f'_c}$  y la aportación de las fibras la cual se estimó como  $4V_f^{0.9}$ .

En Chile, se realizaron pruebas experimentales para estudiar el efecto del incremento de la resistencia a corte del concreto con fibras medido a través de la tenacidad (Carmona y Cabrera, 2009). La tenacidad se define según la SF-5 de la JSCE (1984b) como el área bajo la curva de la gráfica curva carga-desplazamiento hasta una cierta deformación axial. Algunos autores la definen de distintas maneras, pero el JSCE (1984b) lo delimita hasta una deformación axial de 0.75 mm. Este criterio también fue utilizado por Barragán et. al (2016), para deformaciones de 0.25, 0.5 y 1.0 mm. Los resultados del ensaye muestran que la tenacidad del concreto reforzado con fibras aumenta conforme aumenta el porcentaje del volumen de fibras y la relación de aspecto de las fibras.



### **CAPÍTULO 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES**

En este capítulo se describen las pruebas experimentales realizadas a un muro aislado y a un modelo de edificio, ambos a escala 1:2. Se presentan: la técnica de rehabilitación de encamisado parcial de muros de mampostería con fibra de vidrio; la geometría de los modelos; los armados de los elementos de concreto; instrumentación empleada; el protocolo de carga; y el registro sísmico empleado.

Es importante mencionar que, tanto el muro aislado, como el modelo de edificio, fueron inicialmente ensayados hasta que se llevaron a un estado de daño considerable, con anchos de grieta residual menores que 5 mm. Para determinar la eficiencia de la malla de fibra de vidrio, como técnica de rehabilitación, se decidió rehabilitarlos para estudiar su comportamiento.

#### **3.1. Descripción de la técnica de encamisado de muros con malla de fibra de vidrio**

El proceso de rehabilitación consistió en los siguientes pasos:

1. Evaluación del daño en la estructura. Primero, se realizó una evaluación del daño presente en la estructura. En la Figura 5 se puede observar el modo de falla de la estructura fue por tensión diagonal y deslizamiento del muro a la mitad de la altura. Por el daño observado se decidió reparar por medio de rajuelas y sustituir las piezas aplastadas para después aplicar el encamisado parcial de muros.



**Figura 5. Modelo de edificio después del primer ensaye**

2. Retiro de recubrimiento del muro. Se preparó la superficie del muro que recibió el encamisado. Se retiró el recubrimiento de pintura y se humedeció la superficie para asegurar adherencia entre la mampostería y el mortero de rehabilitación, como se observa en la Figura 6.



**Figura 6. Preparación de superficie de muros para recibir encamisado**

3. Reparación del muro mediante sustitución de piezas, rajuelas y remplazo de concreto: Se aplicaron rajuelas y se remplazaron las piezas junto al concreto dañado. En la Figura 7 se observa el muro reparado, listo para recibir la primera capa de mortero.



**Figura 7. Muros reparados mediante rajuelas, sustitución de piezas, y remplazo de concreto en castillos**



4. Aplicación de la primera capa de mortero. Se aplicó una primera capa de mortero de aproximadamente medio centímetro de espesor, donde posteriormente se coloca la malla de fibra de vidrio. En la Figura 8 se observa cómo se coloca el mortero sobre la superficie del muro.



**Figura 8. Aplicación de la primera capa de mortero en muro**

5. Colocación de la malla de refuerzo. Luego de aplicar la primera capa de concreto, se sobrepondrá la malla de fibra de vidrio como se aprecia en la Figura 9.



**Figura 9. Colocación de malla de fibra de vidrio en muro**

6. Aplicación de la segunda capa de mortero. Después de colocar la malla de refuerzo se aplica la capa final de mortero sobre la malla y el espesor final del encamisado parcial es aproximadamente de 1 cm de espesor. En la Figura 10 se aprecia el muro de mampostería una vez se le aplico la última capa de mortero.



**Figura 10. Aplicación de la segunda capa de mortero en muro**

### 3.2. Pruebas en muro aislado

En esta sección se presenta el desarrollo de la prueba experimental del muro aislado. Se describe el modelo utilizado, así como la instrumentación utilizada y el protocolo de carga. Los resultados experimentales del ensaye se discutirán posteriormente en el capítulo 4.

#### 3.2.1. Geometría

Se trató de un muro de mampostería a escala 1:2 con ladrillo multiperforado de dimensiones  $6 \times 6 \times 12$  cm. El espécimen tuvo una altura de 115 cm y una longitud de 120 cm. Estaba confinado por castillos de  $6 \times 7.5$  cm. Se desplanto sobre una viga de cimentación de  $80 \times 50$  cm la cual proporcionaba una condición de empotramiento en la base del espécimen y una losa con dimensiones de  $45 \times 10$  cm. El muro original se denominó como M1-cr; y ya rehabilitado con la malla de fibra de vidrio se nombró como M1-crR. En la Figura 11 se muestra la geometría general del modelo y en la Figura 12 se observa el espécimen antes de ensayarse.

Las dimensiones y armados de castillos y dalas se muestran en la Figura 13. Los castillos eran de  $60 \times 75$  mm y las dalas de  $60 \times 123$ . Ambos tenían cuatro barras de refuerzo longitudinal de 6 mm de diámetro con estribos de 3.25 mm (calibre 10.5) con una separación de 90 mm.

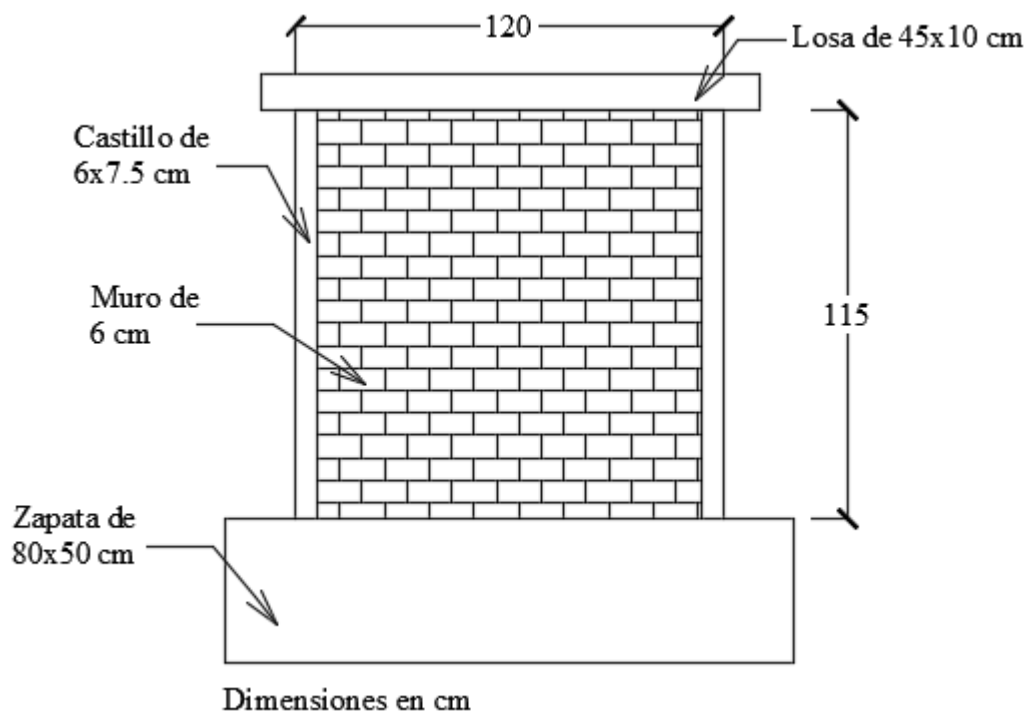


Figura 11. Geometría del muro



Figura 12. Modelo M1-crR antes de ensayarse

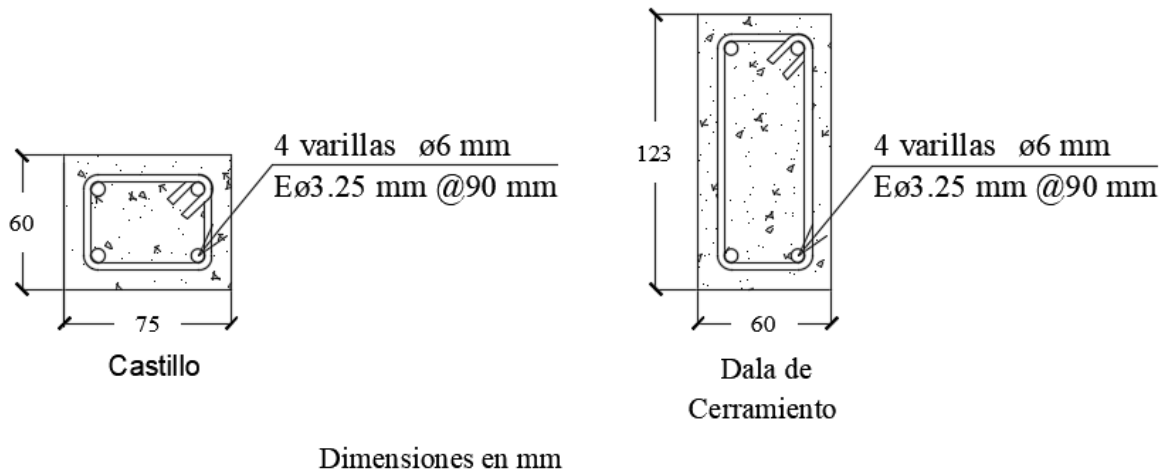
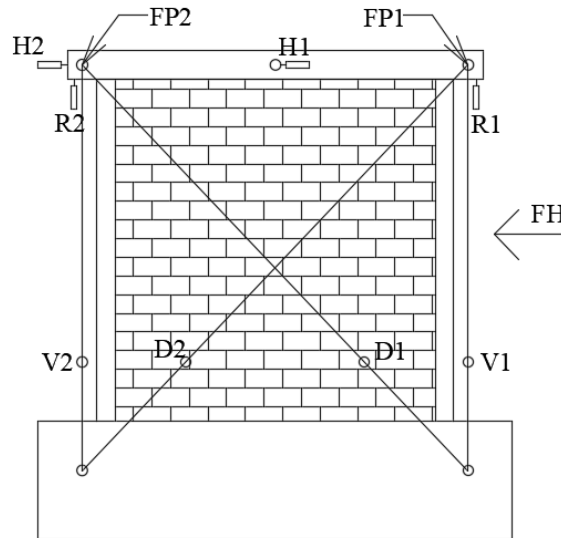


Figura 13. Detalle tipo de castillo y dala de cerramiento

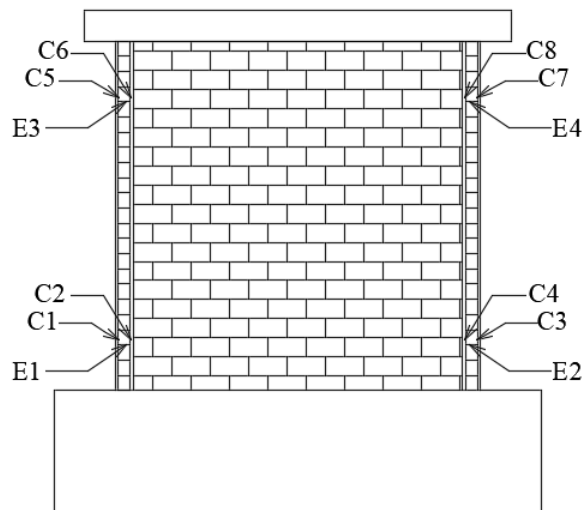
### 3.2.2. Instrumentación

El modelo original y rehabilitado se instrumentó para medir su comportamiento. Se usó una celda de carga, transductores CDP-50, micrómetros DDP-50. En la Figura 14 se muestra la configuración de la instrumentación externa.



**Figura 14. Instrumentación externa del muro**

Adicionalmente, el modelo fue instrumentado interiormente con deformímetros adheridos al refuerzo longitudinal y transversal como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15. Instrumentación interna del muro**

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la descripción, clave, unidad de medición y modelo de la instrumentación utilizada en el muro.

**Tabla 2. Descripción de instrumentación en muro M1-crR**

<b>CLAVE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>MODELO</b>
<b>FH</b>	Actuador horizontal MTS	t	
<b>H1</b>	Horizontal losa superior, Sur	mm	LVDT*
<b>H2</b>	Horizontal losa superior, Norte	mm	LVDT
<b>FP1</b>	Fuera del plano, lado Este	mm	LVDT
<b>FP2</b>	Fuera del plano, lado Oeste	mm	LVDT
<b>V1</b>	Vertical lado Este	mm	LVDT
<b>V2</b>	Vertical lado Oeste	mm	LVDT
<b>D1</b>	Diagonal Oeste arriba a Este abajo	mm	LVDT
<b>D2</b>	Diagonal Este arriba a Oeste abajo	mm	LVDT
<b>R1</b>	Rotación: vertical losa lado Este	mm	LVDT
<b>R2</b>	Rotación: vertical lado Oeste	mm	LVDT
<b>C1</b>	SG longitudinal castillo Este abajo 1	μ	Deformímetro
<b>C2</b>	SG longitudinal castillo Este abajo 2	μ	Deformímetro
<b>C3</b>	SG longitudinal castillo Oeste abajo 1	μ	Deformímetro
<b>C4</b>	SG longitudinal castillo Oeste abajo 2	μ	Deformímetro
<b>C5</b>	SG longitudinal castillo Este arriba 1	μ	Deformímetro
<b>C6</b>	SG longitudinal castillo Este arriba 2	μ	Deformímetro
<b>C7</b>	SG longitudinal castillo Oeste arriba 1	μ	Deformímetro
<b>C8</b>	SG longitudinal castillo Oeste arriba 2	μ	Deformímetro
<b>E1</b>	SG estribo castillo Este abajo	μ	Deformímetro
<b>E2</b>	SG estribo castillo Oeste abajo	μ	Deformímetro
<b>E3</b>	SG estribo castillo Este arriba	μ	Deformímetro
<b>E4</b>	SG estribo castillo Oeste arriba	μ	Deformímetro

\* LVDT = Transductor diferencial de variación lineal

### 3.2.3. Protocolo de carga

Para la prueba de muro aislado primero se aplicaron dos ciclos de carga controlada a 0.6 y 1.2 t. Después se aplicó el protocolo de cargas de la Figura 16, el cual estuvo controlado por desplazamientos.

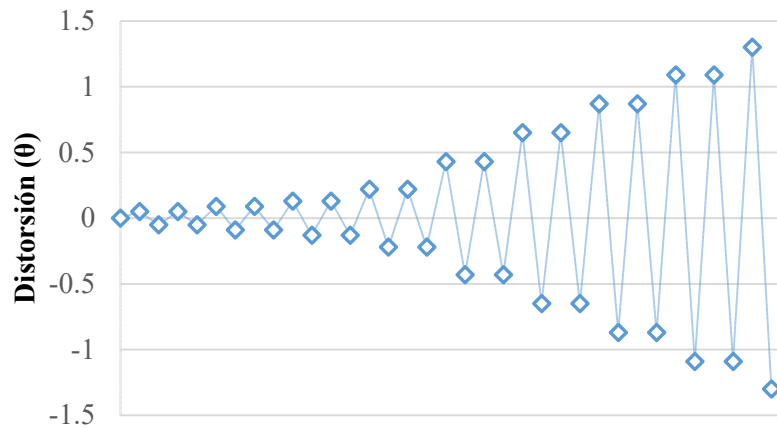


Figura 16. Protocolo de carga para muro aislado

### 3.3. Pruebas en mesa vibradora de modelo de edificio

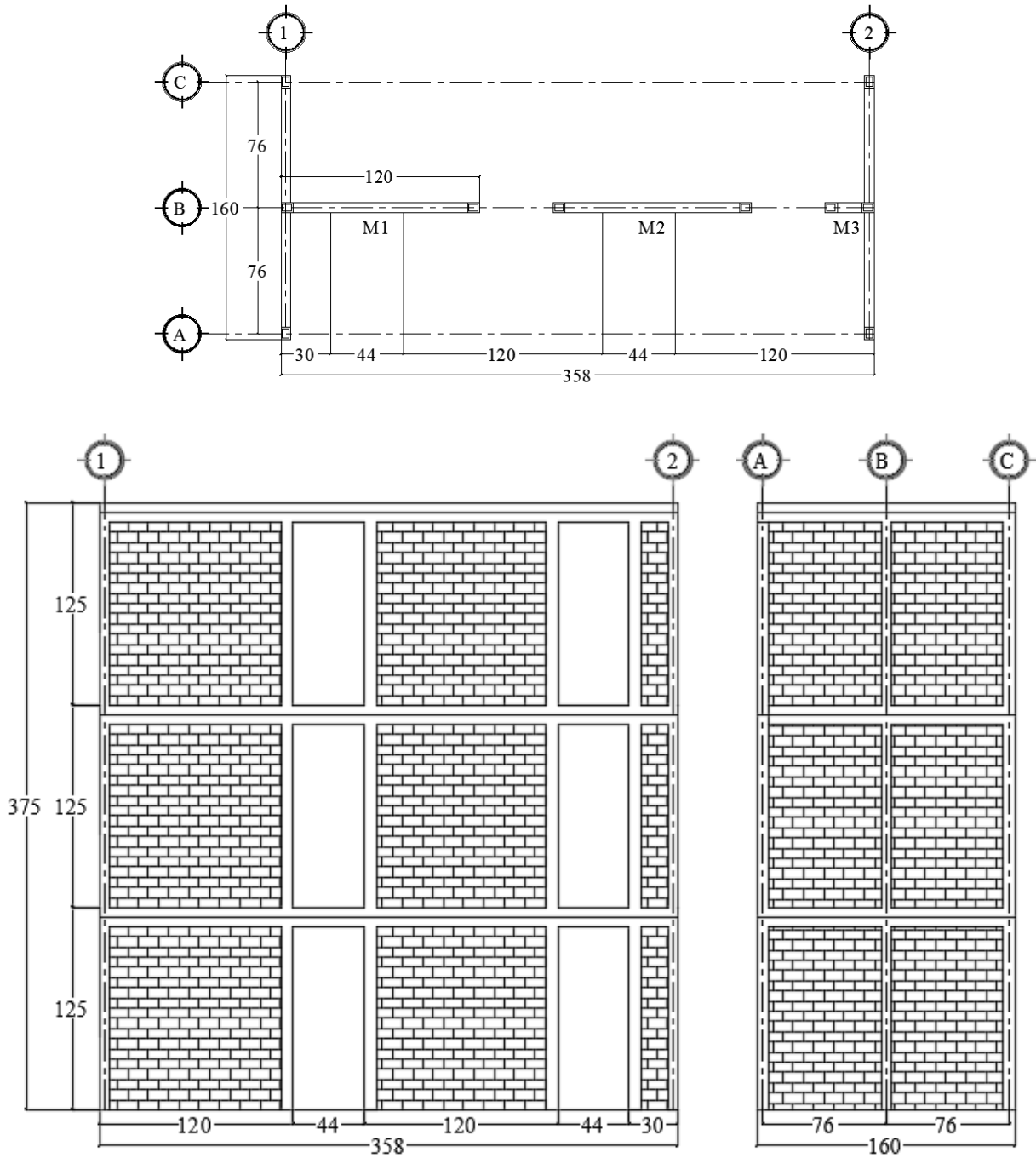
En esta sección se describen las pruebas experimentales de mesa vibradora, se da una descripción del modelo utilizado con armados de los elementos de concreto, así como la instrumentación y los registros utilizados. Los resultados experimentales del ensayo se discutirán posteriormente en el capítulo 4.

#### 3.3.1. Geometría del modelo de edificio

El modelo ensayado en la mesa vibradora, fue un edificio de mampostería de tres niveles a escala 1:2 con una altura de 3.75 m. Se hizo de ladrillo multiperforado de dimensiones 6x6x12 cm, que fue el mismo tipo de pieza que en el modelo de muro aislado. Los alzados y la vista en planta del modelo se presentan en la Figura 17.

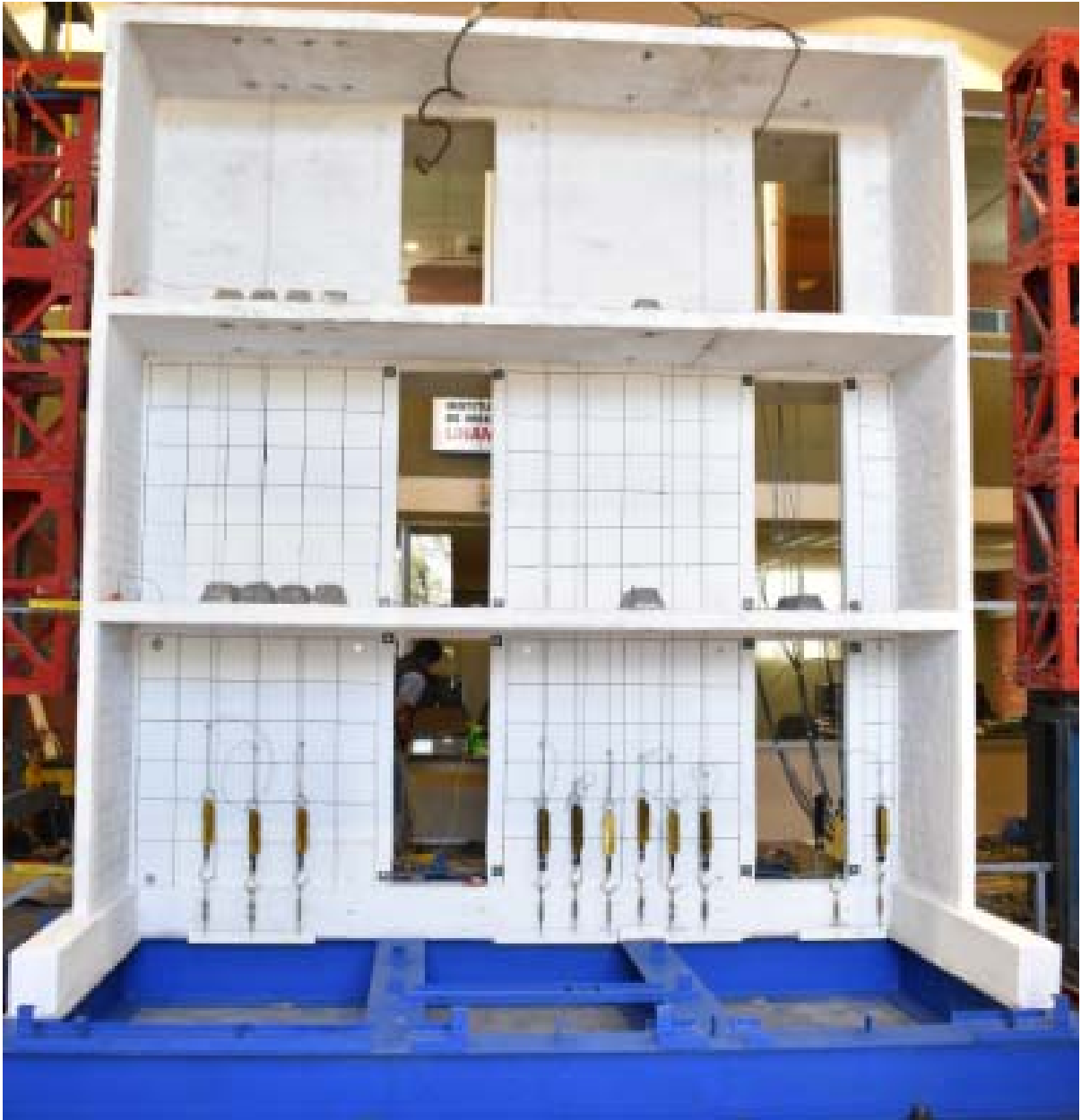
La Figura 18 muestra una fotografía general del modelo del edificio rehabilitado. Los castillos y las dalas son de las mismas dimensiones y armados que la del modelo de muro aislado. Los castillos tenían barras de refuerzo con diámetro de 6 mm y estribos de diámetro de 3.25. El esfuerzo especificado de fluencia del acero longitudinal fue de 412 MPa y el del acero transversal de 210 MPa. La Figura 19 muestra los armados de castillos y dalas



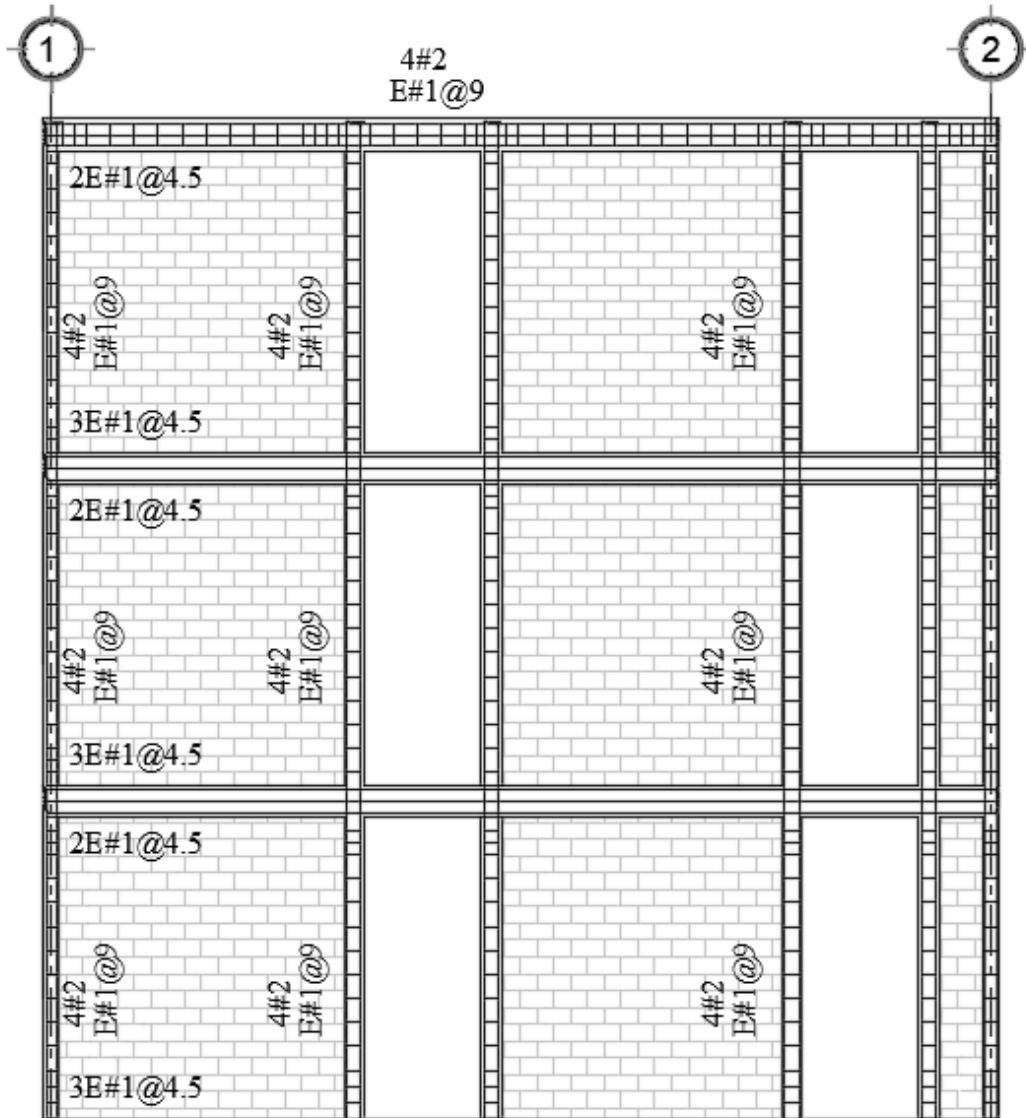


Dimensiones en cm

Figura 17. Geometría del modelo de edificio

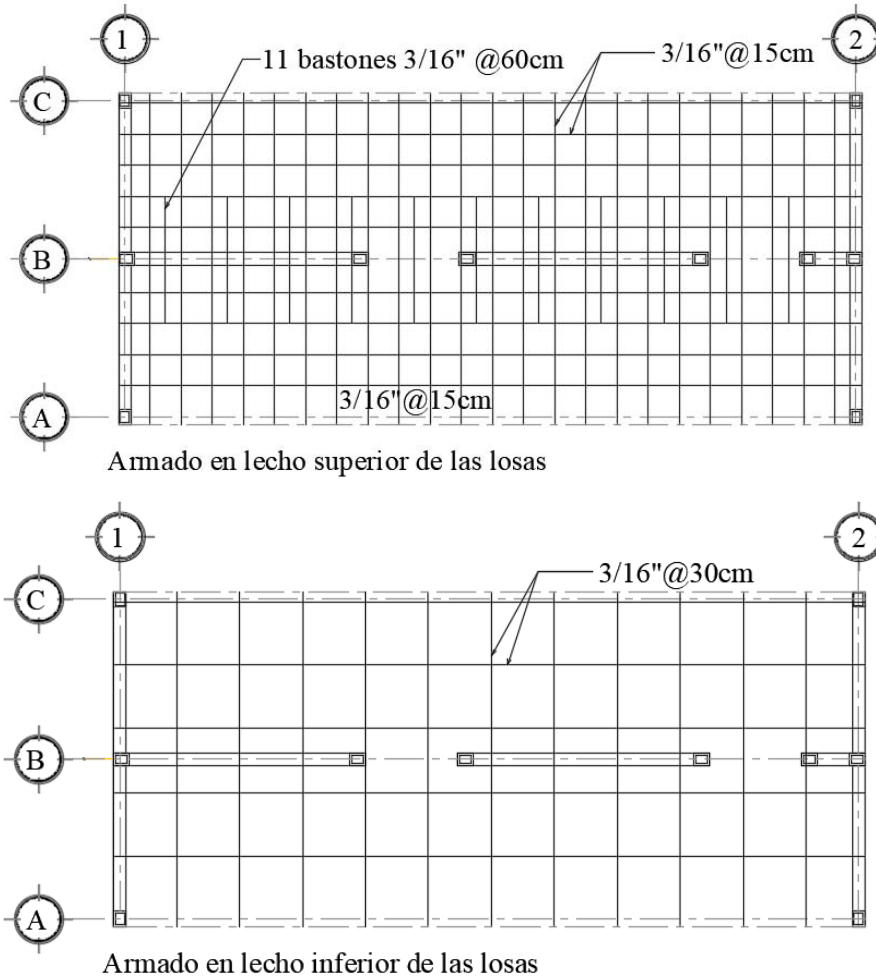


**Figura 18. Modelo de edificio antes de ensayarse**



**Figura 19. Armado de castillos y dalas (Edificio 3 niveles)**

La losa maciza fue de 1.60 m  $\times$  3.58 m y tenía un peralte de 8 cm. Estaba armada con barras de 3/16" a cada 15 cm en ambas direcciones y tenía 11 bastones de 60 cm sobre el muro del eje B como se muestra en la Figura 20.



**Figura 20. Armado de losas del edificio**

Al modelo se le agregó una carga adicional al peso propio con lingotes de plomo y dinamómetros. Los lingotes simulan carga en la estructura y los dinamómetros imponen una carga axial adicional a los muros (Ver Tabla 3). La distribución de estos elementos adicionales se puede ver en la Figura 21.

**Tabla 3. Carga adicional asignado por tensado de cable**

MURO	NO. CABLES	TENSIÓN POR CABLE (N)	TENSIÓN TOTAL (N)
M1	6	529.7	3178.4
M2	12	588.6	7053.4
M3	6	461.1	2766.4

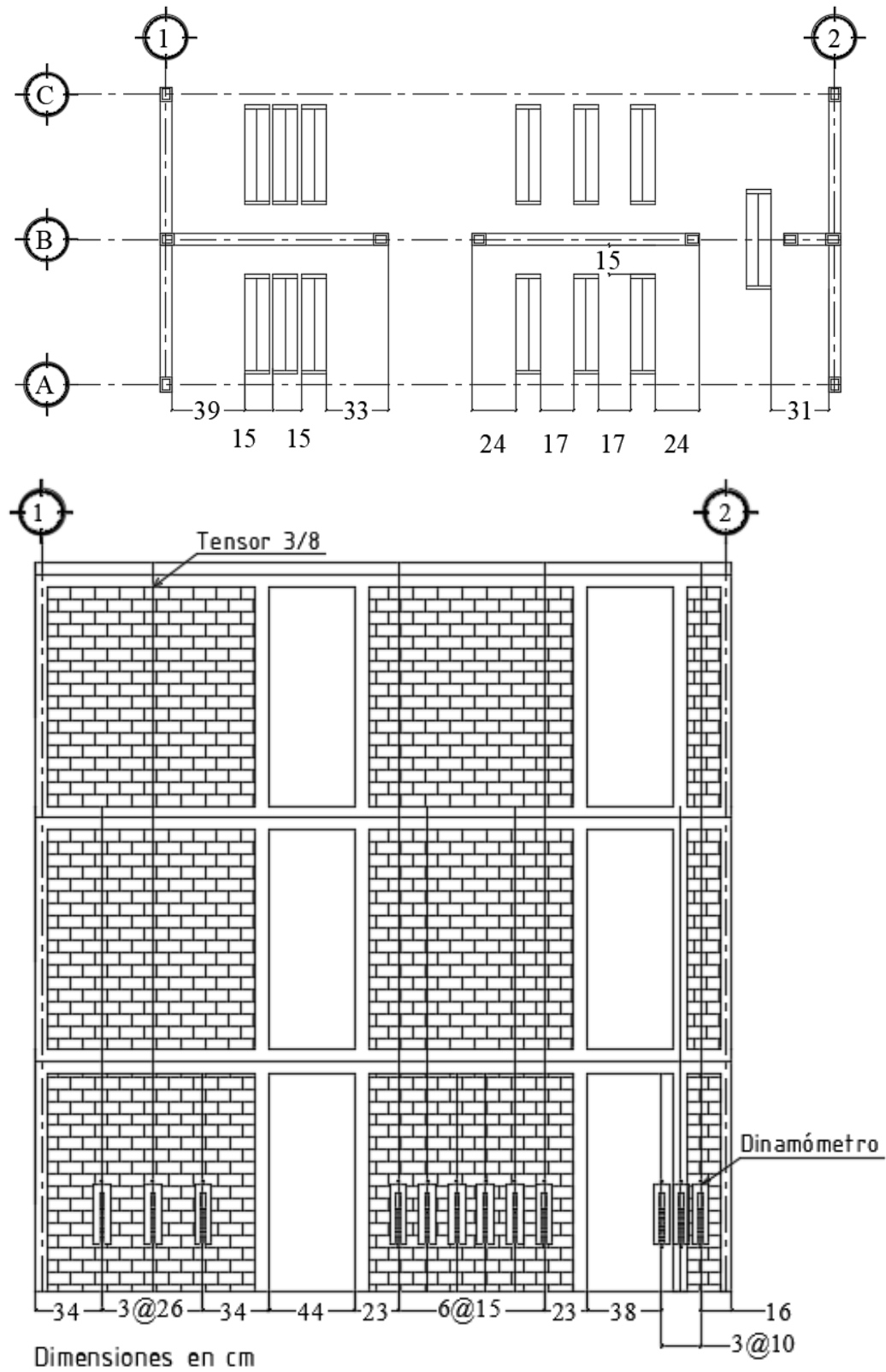


Figura 21. Ubicación de lingotes de plomo y dinamómetros en el modelo del edificio

### 3.3.2. Instrumentación

La instrumentación juega un papel muy importante en un ensayo experimental, ya que la correcta interpretación del comportamiento global del modelo, dependerá directamente de los resultados obtenidos a partir de los instrumentos.

En la Figura 22 se observan la instrumentación empleada para tomar mediciones. Se utilizaron transductores de desplazamiento de 200 mm de carrera para medir desplazamientos laterales del modelo, de 50 mm para las diagonales en los muros y de 25 mm para tomar las deformaciones verticales. También, se colocaron diez acelerómetros en distintos puntos de interés de la estructura, todo con el fin de observar el comportamiento global del modelo para los movimientos inducidos.

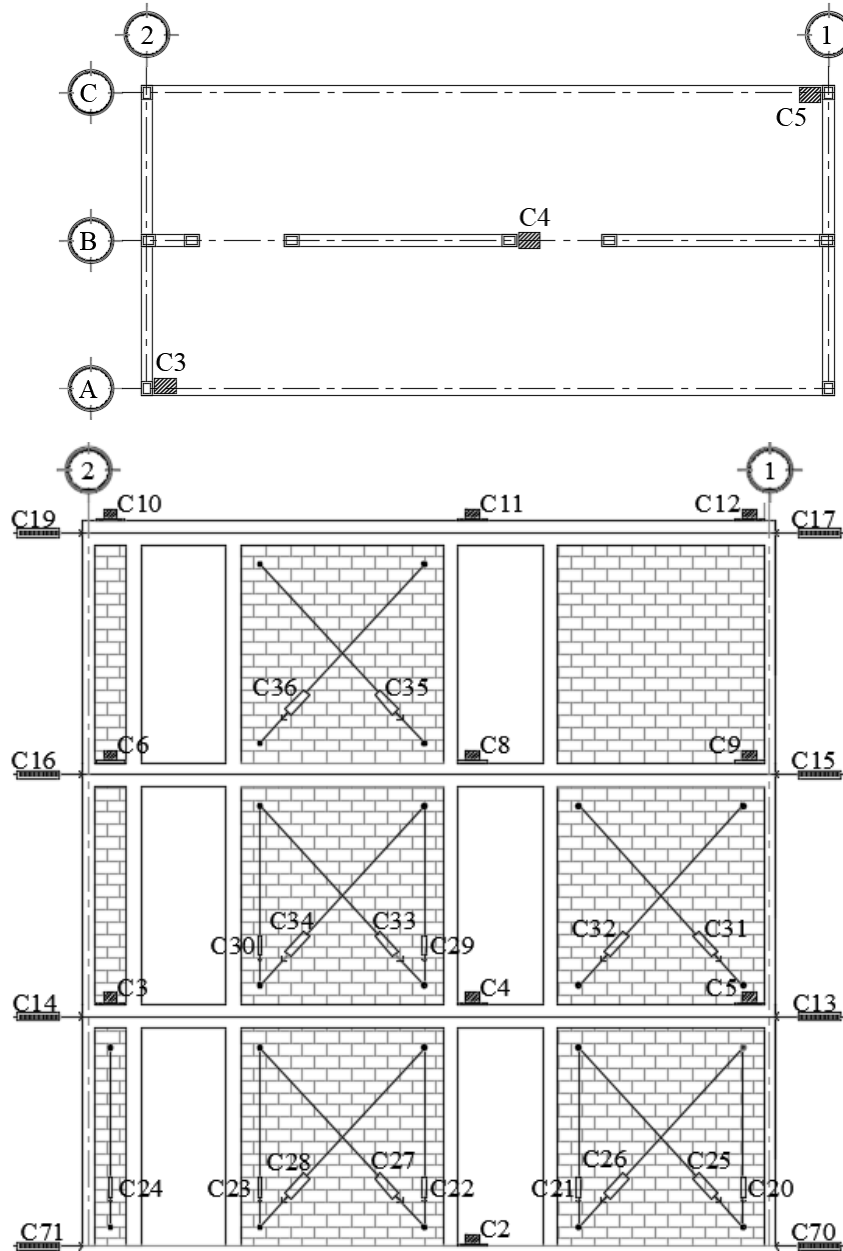


Figura 22. Instrumentación externa del modelo (Edificio 3 niveles)

También se colocaron deformímetros internos de 2 mm de longitud en el acero de refuerzo longitudinal y transversal en castillos distribuidos en cada entrepiso como se observa en la Figura 23. Con base a las deformaciones obtenidas es posible determinar los esfuerzos por medio de la curva esfuerzo-deformación del acero.

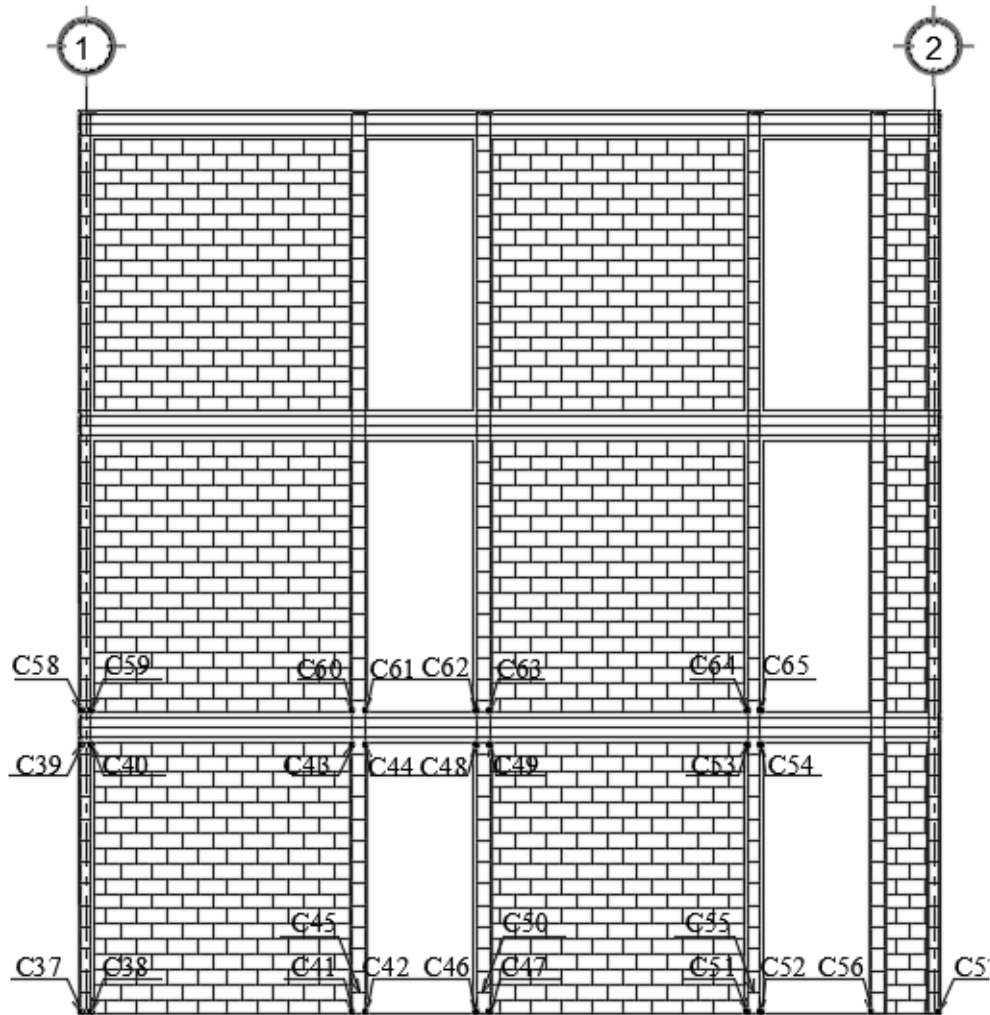
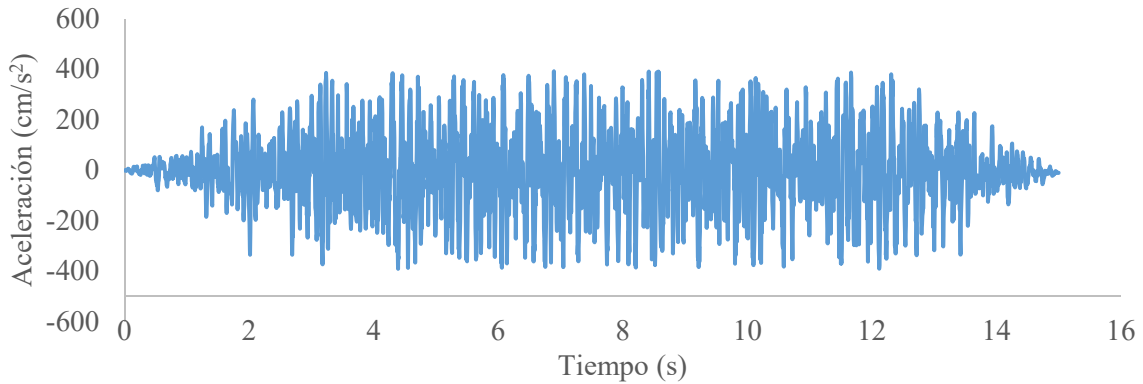


Figura 23. Instrumentación interna del modelo del edificio

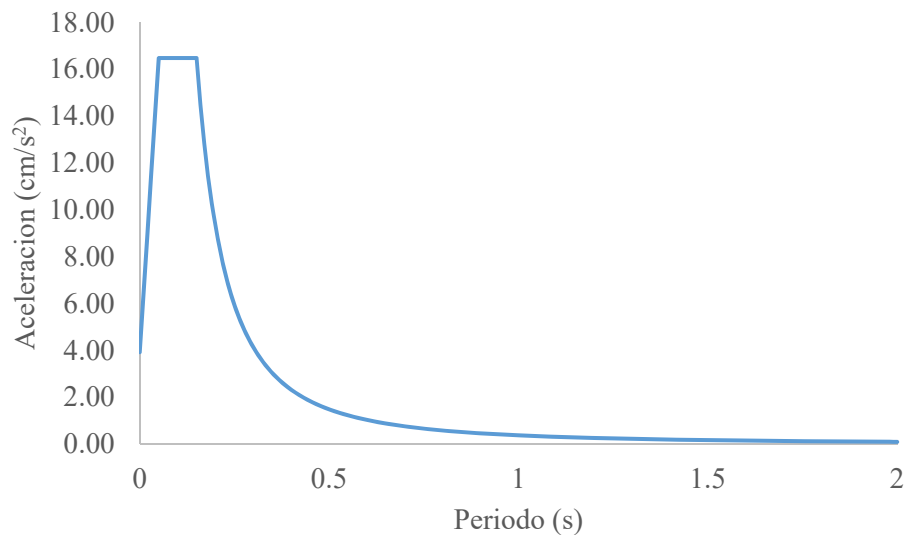
### 3.3.3. Movimiento en la base

Se utilizó un registro sintético obtenido de Acapulco para llevar a la estructura a un estado de daño considerable, en la Figura 24 se puede observar el acelerograma sintético utilizado.



**Figura 24. Acelerograma sintético utilizado para pruebas en mesa vibradora**

Dado que las estructuras de mampostería suelen tener periodos de vibrar bajos, se utilizó un movimiento con contenido de frecuencias altas. En la Figura 25 se muestra el espectro de respuesta del acelerograma. Se observa que la meseta se encuentra entre 0.05 y 0.15 s.



**Figura 25. Espectro de respuesta objetivo**

### 3.3.4. Programa de pruebas

Para el modelo original, se aplicó el programa de pruebas de la Tabla 13. Para el modelo rehabilitado se aplicó el programa de pruebas de la Tabla 14. Se observa que en la prueba del modelo M3N se alcanzó una aceleración máxima en la base ( $a_{base}$ ) de 1.31 g, mientras que en la prueba del modelo M3N-R se alcanzó una aceleración de 1.27 g.



### 3.4. Proceso de rehabilitación del segundo nivel del modelo de edificio

Después de haber ensayado el muro aislado, se observó que este tuvo un incremento de su resistencia ante cargas laterales del 45% debido a la rehabilitación, por lo que se tomó la decisión de reforzar el segundo nivel del edificio para asegurar que el mecanismo de falla se presente en el primer nivel. De lo contrario se puede presentar un daño significativo en el segundo nivel. Estos resultados se explican en la sección 4.2.3. En la Figura 26 se observan algunas imágenes del proceso de rehabilitación del segundo nivel.



a) Retiro de recubrimientos



b) Aplicación de la primera capa de mortero

**Figura 26. Proceso de rehabilitación de muros del segundo nivel del edificio**

La Figura 27 muestra el modelo después de haber rehabilitado el segundo nivel



**Figura 27. Segundo nivel rehabilitado del modelo del edificio**

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de los modelos del muro aislado, del edificio de tres niveles y los ensayos de pilas, muretes y cilindros que se tomaron como muestras. Se muestran resultados de interés ingenieril como modos de falla, relaciones carga desplazamiento, envolvente, distorsiones de entrepiso, entre otros.

### 4.1. Ensaye de muestras

Se elaboraron muestras de pilas, muretes y cilindros para determinar la resistencia a compresión y a tensión diagonal de la mampostería, así como la resistencia a compresión del mortero.

#### 4.1.1. Pilas

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos de pilas realizados sin refuerzo para calcular la resistencia a compresión de la mampostería.

**Tabla 4. Resultados experimentales de pilas de mampostería sin refuerzo**

Espécimen	Base (cm)	Altura (cm)	Espesor (cm)	$P_{max}$ kg	$f_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
P1	11.9	26.2	6	7367	103.2
P2	12.2	25.8	6.1	7923	106.5
P3	12	26.2	5.9	7206	101.8
<b>Promedio</b>				<b>103.81</b>	

Según la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017), la resistencia a compresión para diseño de la mampostería se obtendrá por medio de un coeficiente de variación y un factor correctivo por esbeltez.

#### *Coeficiente de variación*

Según las NTC-DCEM (2017), el coeficiente de variación se toma como el mayor valor entre 0.15 y

$$C_m = DE / \overline{f_m} \quad (1)$$

Donde:

$C_m$ : Coeficiente de variación

$DE$ : Desviación estándar

$\overline{f_m}$ : Resistencia a compresión promedio de la mampostería

Según los resultados experimentales, se obtuvo un valor de  $C_m$  como se muestra a continuación:

$$C_m = \frac{2.4 \text{ kg/cm}^2}{103.8 \text{ kg/cm}^2}$$

Por lo tanto se toma  $C_m = 0.15$

#### *Factor correctivo por esbeltez*

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017) proponen una tabla para obtener un factor correctivo de la resistencia a compresión según la esbeltez de la pila. Para valores intermedios de la tabla, se deberá interpolar linealmente.

**Tabla 5. Factor correctivo por esbeltez**

Relación de espesor de la pila	2	3	4	5	6
Factor correctivo	0.75	0.90	1.00	1.05	1.06

Para las pilas ensayadas  $h/e = 4.35$ ; por lo tanto  $F_{correctivo} = 1.02$

#### *Resistencia a compresión para diseño*

La fórmula para calcular la resistencia a compresión de diseño de la mampostería según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017) es:

$$f'm = \overline{f_m} \cdot F_{correctivo} / 1 + 2.5C_m \quad (2)$$

$$f'm = \frac{(103.81 \text{ kg/cm}^2)(1.02)}{1 + 2.5(0.15)}$$

$$f'm = 77 \text{ kg/cm}^2$$

En la Figura 28 se observa la prueba destructiva de las pilas con refuerzo de malla de fibra de vidrio, en donde se aprecia que el tipo de falla en esta fue por flexo compresión.



**Figura 28. Ensayo de pilas**

En la Tabla 6 se muestran el resumen de la resistencia a compresión de la mampostería reforzada, obtenida de dos muestras ensayadas.

**Tabla 6. Resultados experimentales de pilas con refuerzo**

Espécimen	Base (cm)	Altura (cm)	Espesor (cm)	h/e	$P_{max}$ , kg	$f_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
P1R	12	27.3	7	3.9	6800	81
P2R	11.9	27.1	7	3.87	9000	108
<b>Promedio</b>						<b>94.5</b>

Según la Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017), la resistencia de diseño de la mampostería se obtendrá por medio de un coeficiente de variación y un factor correctivo por esbeltez.

#### *Coeficiente de variación*

El coeficiente de variación se obtendrá con la Ecuación (1), se toma el mayor valor entre 0.15 y:

Según los resultados experimentales, se obtuvo un valor de  $C_m$  como se muestra a continuación:

$$C_m = 19.2 \text{ kg/cm}^2 / 94.5 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto se toma  $C_m = 0.15$

#### *Factor correctivo por esbeltez*

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017) proponen una tabla para obtener un factor correctivo de la resistencia a compresión según la esbeltez de la pila. Para valores intermedios de la tabla, se deberá interpolar linealmente.

**Tabla 7. Factor correctivo por esbeltez**

Relación de espesor de la pila	2	3	4	5	6
Factor correctivo	0.75	0.90	1.00	1.05	1.06

Para las pilas ensayadas  $h/e = 3.88$ ; por lo tanto  $F_{correctivo} = 0.99$

#### *Resistencia a compresión para diseño*

La resistencia a compresión de diseño de la mampostería se obtendrá con la Ecuación (2).

$$f'_m = \frac{(94.5 \text{ kg/cm}^2)(0.99)}{1 + 2.5(0.15)}$$

$$f'_m = 68 \text{ kg/cm}^2$$

#### **4.1.2. Muretes**

En la Tabla 8 se muestran los resultados de los muretes realizados sin refuerzo para calcular la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Se observa que la mampostería sin refuerzo tiene una resistencia promedio de  $6.05 \text{ kg/cm}^2$

**Tabla 8. Resultados experimentales de muretes sin refuerzo**

Espécimen	Base (cm)	Altura (cm)	Espesor (cm)	$P_{max}$ (kg)	$v_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1	18.5	19.4	6	1010	6.3
M2	18.6	19.2	6	1030	6.3
M3	19	19.1	7	986	6.2
M4	19	19.1	7	841	5.5
<b>Promedio</b>					6.1

### *Coefficiente de variación*

Según las NTC-DCEM (2017), el coeficiente de variación para se toma el mayor valor entre 0.20 o

$$C_v = DE/\bar{c}_v \quad (3)$$

Donde:

$C_v$ : Coeficiente de variación.

$\bar{c}_v$ : Resistencia media a compresión diagonal de muretes.

$$C_v = \frac{0.8 \text{ kg/cm}^2}{12.9 \text{ kg/cm}^2}$$

Por lo tanto,  $C_v = 0.20$

### *Resistencia a tensión diagonal para diseño*

La resistencia a tensión diagonal de diseño de la mampostería según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017) es:

$$v'_m = \bar{v}_m / (1 + 2.5C_v) \quad (4)$$

Donde:

$v'_m$ : Resistencia a compresión diagonal para diseño.

$$v'_m = \frac{(6.1 \text{ kg/cm}^2)}{1 + 2.5(0.2)}$$

$$v'_m = 4 \text{ kg/cm}^2$$

Se ensayaron dos muretes para determinar la resistencia a tensión diagonal de la mampostería reforzada. En la figura 29 se muestra la prueba destructiva de los muretes, donde se aprecia un tipo de falla por tensión diagonal.



**Figura 29. Ensayo de muretes**

En la Tabla 9 se muestran un resumen de la resistencia a tensión diagonal de la mampostería reforzada. Se puede apreciar que la resistencia promedio fue de  $12.9 \text{ kg/cm}^2$ .

**Tabla 9. Resultados experimentales de muretes**

Espécimen	Base (cm)	Altura (cm)	Espesor (cm)	Longitud diagonal (cm)	$P_{max}$ (kg)	$v_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1	18.6	19.2	7	26.1	2460	13.5
M2	18.4	19.1	7	26.1	2250	12.3
					Promedio	12.9

*Coefficiente de variación*

El coeficiente de variación se obtendrá con la Ecuación (3), se toma el mayor valor entre 0.20 o

$$C_v = \frac{0.82 \text{ kg/cm}^2}{12.9 \text{ kg/cm}^2}$$

Por lo tanto,  $C_v = 0.20$

### *Resistencia a tensión diagonal para diseño*

La resistencia a compresión diagonal de diseño de la mampostería se obtendrá con la Ecuación (4):

$$v'_m = \frac{\overline{v}_m}{1 + 2.5C_v}$$

$$v'_m = \frac{(12.9 \text{ kg/cm}^2)}{1 + 2.5(0.2)}$$

$$v'_m = 8.6 \text{ kg/cm}^2$$

### **4.1.3. Cilindros**

#### *Mortero de rehabilitación:*

Se ensayaron dos muestras con forma de cilindros para determinar la resistencia a compresión del mortero de rehabilitación. En la Figura 30 se muestran fotos de los ensayos.



**Figura 30. Ensayo de cilindros del mortero de rehabilitación a compresión axial**

En la Tabla 10 se muestran un resumen de la resistencia a compresión del mortero de rehabilitación, obtenida de las dos muestras ensayadas. La ficha técnica del mortero de rehabilitación se muestra en el Apéndice A, donde se observa que la resistencia es similar a la estimada en los ensayos.



**Tabla 10. Resultados experimentales de cilindros**

Espécimen	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	7.5	15.14	8350	191.2
C2	7.5	14.97	9250	211.3
			<b>Promedio</b>	201.2

*Concreto de la cimentación y de las losas:*

Se elaboraron cilindros de 10 cm de diámetro por 30 cm de altura para obtener la resistencia a compresión del concreto utilizado para colar la cimentación y las losas de cada nivel. En la Figura 31 se observa el ensaye a compresión axial de los cilindros.



**Figura 31. Ensaye de cilindros de concreto utilizados en cimentación y losas a compresión axial**

En las Tabla 11 a la 14 se muestran un resumen de la resistencia a compresión del concreto utilizado en el colado de la cimentación y de las losas del primer al tercer nivel.

**Tabla 11. Resultados experimentales de cilindros de concreto utilizado en la cimentación**

Especímenes cimentación				
Espécimen	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	10.1	30.9	23800	297
C2	9.9	30.9	23877	310
C3	10	30.8	29650	377
			<b>Promedio</b>	328

**Tabla 12. Resultados experimentales de cilindros de concreto utilizado en la losa del primer nivel**

Especímenes losa primer nivel				
Espécimen	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	10.1	31.6	24520	312
C2	10	31	18566	236
C3	10	31.6	30969	394
<b>Promedio</b>				314

**Tabla 13. Resultados experimentales de cilindros de la losa del segundo nivel**

Especímenes losa segundo nivel				
Espécimen	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	10	31.3	21585	275
C2	10	31.4	25904	330
C3	10	31.3	25534	325
<b>Promedio</b>				310

**Tabla 14. Resultados experimentales de cilindros de la losa del tercer nivel**

Especímenes losa tercer nivel				
Espécimen	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
C1	10	31.3	28470	363
C2	10	31.4	16182	206
C3	10	31.3	15564	198
<b>Promedio</b>				256

#### 4.1.4. Cubos

Se elaboraron muestras de cubos con dimensiones de 5 cm, para determinar la resistencia a compresión del mortero utilizado para la construcción del modelo por cada nivel. En la Figura 32 se muestran las fotos de los ensayos.



**Figura 32. Ensayo de cubos**

En las Tabla 15 a la 17 se muestran un resumen de la resistencia a compresión del mortero utilizado para la construcción del modelo, obtenida de las muestras ensayadas.

**Tabla 15. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el primer nivel**

<b>Especímenes primer nivel</b>		
<b>Espécimen</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b><math>f'c</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Cb1.1	5894	235.8
Cb1.2	5691	227.6
Cb1.3	5561	222.4
Cb1.4	4100	164
Cb1.5	3973	158.9
Cb1.6	4130	165.2
	<b>Promedio</b>	<b>195.7</b>

**Tabla 16. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el segundo nivel**

<b>Especímenes segundo nivel</b>		
<b>Espécimen</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b><math>f'c</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Cb2.1	5418	216.7
Cb2.2	4922	196.9
Cb2.3	5107	204.3
Cb2.4	5156	206.3
Cb2.5	5599	224
Cb2.6	5593	223.7
	<b>Promedio</b>	<b>212</b>

**Tabla 17. Resultados experimentales de cubos de mortero utilizado en el tercer nivel**

<b>Especímenes tercer nivel</b>		
<b>Espécimen</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b><math>f'c</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Cb2.1	4249	170
Cb2.2	5485	219.4
Cb2.3	3977	159.1
Cb2.4	4824	193
Cb2.5	4620	184.8
Cb2.6	5314	212.6
	<b>Promedio</b>	<b>189.8</b>

#### **4.1.5. Ensaye de malla SikaWrap - 350G Grid**

Previamente, la universidad politécnica de Milán (Colombi y Poggi, 2018) se encargó de realizar ensayes a la malla SikaWrap – 350G Grid, la cual se utilizó para la realización de este proyecto. La ficha técnica del material (ver Apéndice B) reporta una resistencia de 77 kN/m mientras que la Universidad Politécnica de Milán (Colombi y Poggi, 2018) reporta una resistencia promedio de la malla de 112 kN/m, 45% más de lo indicado por el proveedor. Para más detalles acerca del material se puede consultar la ficha técnica de la malla en el Apéndice B de esta tesis.

## 4.2. Resultados del ensayo del muro aislado

A continuación, se presentan los resultados experimentales de la prueba de muro aislado. Se hace una predicción a la resistencia ante cargas laterales de los muros, se describen los modos de falla observados, y se muestran las relaciones carga-desplazamiento y sus envolventes.

### 4.2.1. Predicción de la resistencia de los modelos a fuerza cortante

Se presentan los cálculos para predecir la resistencia de los modelos. Primero, en el inciso a) se calcula la contribución de la mampostería a la resistencia considerando las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017). Después, en el inciso b) se calcula la contribución del acero de refuerzo. Finalmente, en el inciso c) se calcula la resistencia a cortante por fricción del muro según lo especifican las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-DCEC, 2017).

a) *Resistencia a cortante del muro de mampostería:*

La resistencia a cortante de la mampostería se obtiene con la Ecuación (5):

$$V_{mR} = F_R[(0.5v'_m A_T + 0.3P) \cdot f] \leq 1.5F_R v'_m A_T f \quad (5)$$

Donde:

$F_R$ : Factor de resistencia, se toma igual a 1.

$\bar{v}_m$ : Resistencia a cortante media de la mampostería, con base a los ensayos de muretes se usó un valor de 6.05 kg/cm<sup>2</sup>.

$A_T$ : Área transversal de la sección.

$P$ : Carga axial sobre el muro, se usó una carga axial de 2000 kg para el cálculo de la resistencia.

$f$ : Factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro para calcular la resistencia al agrietamiento por tensión diagonal.

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

$H$ : Altura libre del muro entre elementos capaces de darle apoyo lateral, 125 cm según la geometría del modelo.

$L$ : Longitud efectiva del muro, 120 cm según la geometría del modelo.

Se hace el cálculo para obtener el área de la sección transversal.

$$A_T = t \cdot L = 6 \times 120 = 720 \text{ cm}^2$$

Se obtiene la relación de aspecto del muro para calcular el factor  $f$ .

$$H/L = 125/120 = 1.05$$

Por lo tanto,  $f = 1$

Se obtiene la resistencia del muro de mampostería ante cargas laterales con la ecuación propuesta por el reglamento.

$$V_{mR} = [((0.5)(6.05 \text{ kg/cm}^2)(720 \text{ cm}^2) + (0.3)(2000 \text{ kg})) \cdot 1]$$

$$V_{mR} = 2.8 \text{ t}$$

El cual es menor que:

$$1.5F_R \bar{v}_m A_T f = 1.5(1)(6.1 \text{ kg/cm}^2)(720 \text{ cm}^2)(1)$$

$$1.5F_R \bar{v}_m A_T f = 6.5 \text{ t}$$

*b) Contribución del refuerzo horizontal:*

En el caso que la mampostería requiera refuerzo horizontal las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017) establecen la siguiente ecuación:

$$V_{sR} = F_R \eta \rho_h F_{hy} A_T \quad (7)$$

Donde:

$\eta$ : Factor de eficiencia del refuerzo horizontal.

$\rho_h$ : Cuantía de acero de refuerzo horizontal en el muro.

$F_{hy}$ : Esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo horizontal, se utilizó alambre de 4 mm de diámetro (5/32 pulg), por lo que se considera un  $F_{hy}$  de 6000 kg/cm<sup>2</sup>.

La altura nominal de la pieza es de 6 cm y el espesor de la junta se consideró de 6 mm. Se distribuyó acero de refuerzo a cada 3 hiladas, por lo tanto, se considera la separación del refuerzo horizontal a cada 20 cm.

El valor de  $\rho_h$  se obtiene con la Ecuación (8):

$$p_h = A_{sh}/s_h t \quad (8)$$

$$p_h = \frac{0.12 \text{ cm}^2}{(19.4 \text{ cm})(6 \text{ cm})}$$

$$p_h = 0.00106$$

El producto entre la cuantía de acero horizontal y el esfuerzo especificado de fluencia no será inferior a  $3 \text{ kg/cm}^2$  ni mayor a  $0.15f_{an}f'_m$ .

Donde:

$f_{an}$ : Cociente entre área neta y el área bruta de las piezas, se toma igual a 0.79

$f'_m$ : Resistencia a compresión para diseño de la mampostería, con base a los ensayos de pilas se usó un valor de  $77 \text{ kg/cm}^2$

$$p_h f_{hy} = (0.00106)(6000 \text{ kg/cm}^2)$$

$$p_h f_{hy} = 6.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$0.15f_{an}f'_m = (0.15)(0.79)(77 \text{ kg/cm}^2)$$

$$0.15f_{an}f'_m = 9.1 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto:

$$3 \text{ kg/cm}^2 < 6.4 \text{ kg/cm}^2 < 9.1 \text{ kg/cm}^2$$

El valor de  $\eta$  se obtendrá de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (9)$$

Donde:

$k_0$ : Factor para determinar la resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende de la relación de aspecto.

$k_1$ : Factor de reducción de la resistencia a fuerza cortante de la mampostería que depende de la cuantía de refuerzo.

$\eta_s$ : Factor parcial de eficiencia del refuerzo horizontal que depende de la resistencia a compresión de la mampostería.

La relación de aspecto es igual a 1.05, por lo tanto el factor  $k_0$  es igual a

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{si } H/L \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{si } H/L \geq 1.5 \end{cases} \quad (10)$$

$$k_0 = 1.27$$

A sí mismo, el factor  $k_1$  que dependerá de la cuantía de refuerzo horizontal es igual a:

$$k_1 = 1 - \alpha p_h f_{hy} > 1 - 0.1 f_{an} f'_m \propto \quad (11)$$

Donde:

$\alpha$ : Reducción de la resistencia a fuerza cortante normalizada por unidad de  $p_h f_{hy}$ , se tomara un valor de  $0.045 \text{ kg/cm}^2$  según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-DCEM, 2017).

$$k_1 = 1 - (0.045)(0.00106)(6000 \text{ kg/cm}^2) > 1 - 0.1(0.79)(77 \text{ kg/cm}^2)(0.045 \text{ kg/cm}^2)$$

$$k_1 = 0.71 > 0.73$$

Por lo tanto:

$$k_1 = 0.73$$

La resistencia a compresión de la mampostería es igual ha  $77 \text{ kg/cm}^2$ , por lo tanto el factor  $\eta_s$  es igual a:

$$\eta_s = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 9 \text{ MPa}(90 \text{ kg/cm}^2) \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 6 \text{ MPa}(60 \text{ kg/cm}^2) \end{cases} \quad (12)$$

$$\eta_s = 0.6$$

$$\eta = \frac{2.05 \text{ t}}{(1)(0.00106)(6000 \text{ kg/cm}^2)(720 \text{ cm}^2)} ((1.27)(0.73) - 1) + 0.60$$

$$\eta = 0.6$$

La aportación del acero de refuerzo a la resistencia a cortante del muro es igual a:

$$V_{SR} = (0.60)(0.00106)(6000 \text{ kg/cm}^2)(720 \text{ cm}^2)$$

$$V_{SR} = 2.8 \text{ t}$$

La resistencia total del muro con refuerzo horizontal es la siguiente:

$$V_R = V_{mR} + V_{SR} \quad (13)$$

$$V_R = 2.8 + 2.7 \text{ t} = 5.5 \text{ t}$$

c) Resistencia del muro de mampostería evaluando el cortante por fricción:

Debido a que cambio el modo de falla a deslizamiento en la base, se calculó la resistencia a cortante por fricción del muro de mampostería con la siguiente expresión el cortante por fricción.

$$V_R = (\mu) \left[ (A_{vf}) (f_y) + (N_u) \right] \quad (14)$$

Donde:

$\mu$ : Coeficiente de fricción entre el concreto y la mampostería.

$A_{vf}$ : Área del refuerzo por cortante por fricción.

$f_y$ : Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

$N_u$ : Fuerza de compresión normal al plano crítico.

Entonces, considerando un valor de  $\mu = 0.7$  (el cual se debe verificar con más ensayos), se obtiene un cortante por fricción de:

$$V_R = (0.7)[(2.5\text{cm}^2)(2800\text{kg/cm}^2) + (605\text{kg})]$$

$$V_R = 5.4t$$



#### 4.2.2. Modos de falla en el muro aislado

El mecanismo de falla está asociado a una de falla de corte y deslizamiento. En la Figura 33 se observa una grieta horizontal característica del modo de falla que se presentó a la mitad de la altura del muro. Además, se presentaron grietas a lo largo de las juntas, característica de falla por tensión diagonal especialmente cerca de los bordes.



**Figura 33. Modo de falla del modelo M1-cr**

Debido a la rehabilitación el modelo M1-crR, cambió su modo de falla de compresión diagonal a una falla combinada con deslizamiento en la base y flexo-compresión en los castillos. La falla se presentó para distorsiones a partir de 1%. En la Figura 34 se pueden observar algunas grietas inclinadas menores en el muro rehabilitado. Igual se puede apreciar daño en la parte inferior de los castillos, generado por esfuerzos de flexo-compresión.



**Figura 34. Modo de falla del modelo M1-crR**

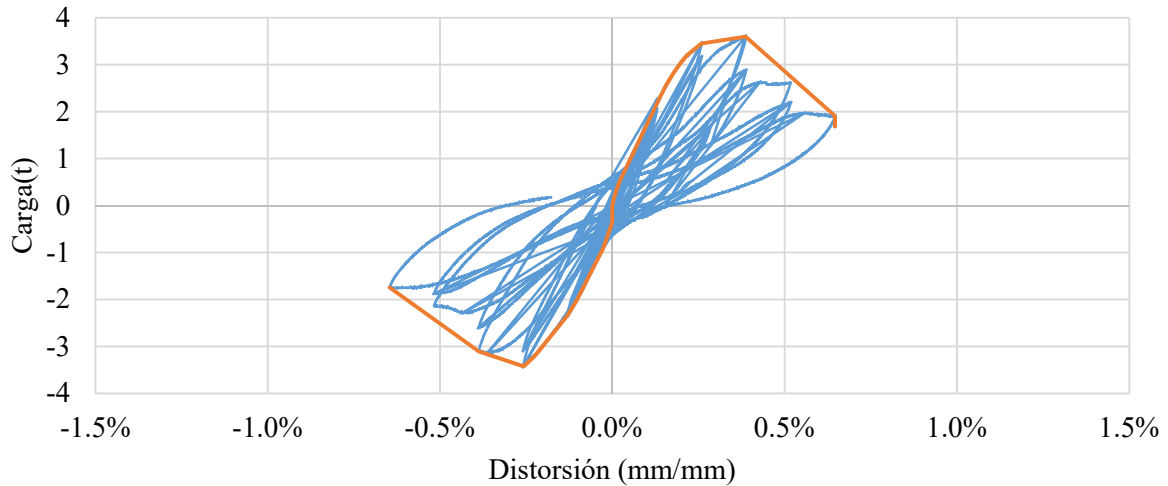
En la Figura 35, se puede observar desprendimiento del encamisado en el modelo M1-crR en las esquinas inferiores. Esto ocurrió por esfuerzos de compresión muy grandes en la zona y quizás por falta de conectores de cortante para garantizar una buena adherencia entre el material base y el encamisado de mortero con malla de fibra de vidrio.



**Figura 35. Desprendimiento del encamisado en modelo M1-crR**

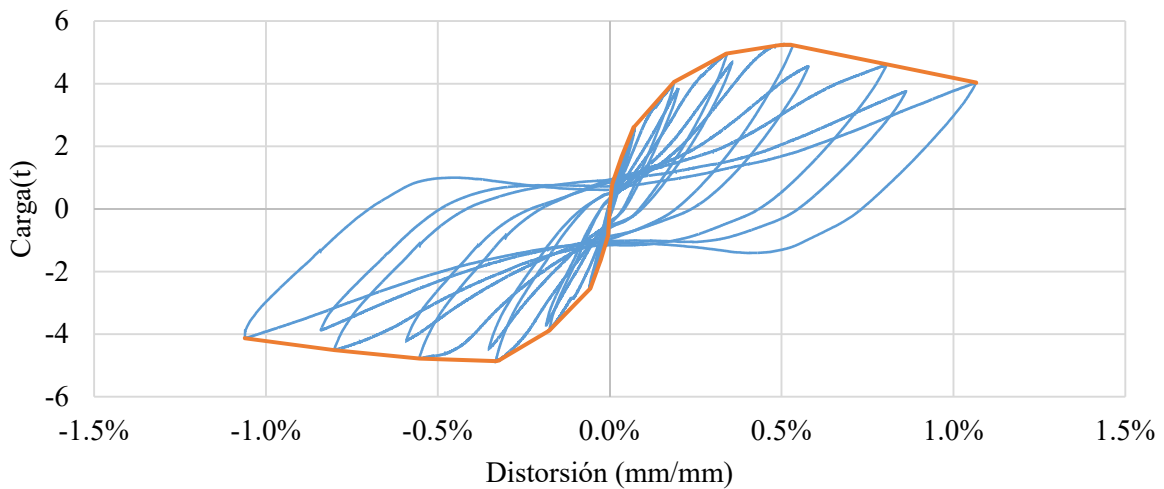
#### **4.2.3. Relaciones carga-desplazamiento y envolventes (muro aislado)**

En la Figura 36, se observa el comportamiento histórico del muro original. Se ve comportamiento lineal, hasta que este empieza a presentar las primeras grietas principales, definidas por el modo de falla a tensión diagonal. También, se puede apreciar que la resistencia máxima ante carga lateral del muro fue de 3.6 t para ciclos positivos, y 3.4 t para ciclos negativos. Después de la carga máxima el modelo presentó una degradación importante de rigidez debido al modo de falla por deslizamiento a la mitad de la altura. La distorsión máxima del muro fue de 0.64%



**Figura 36. Curva de histéresis del modelo M1-cr**

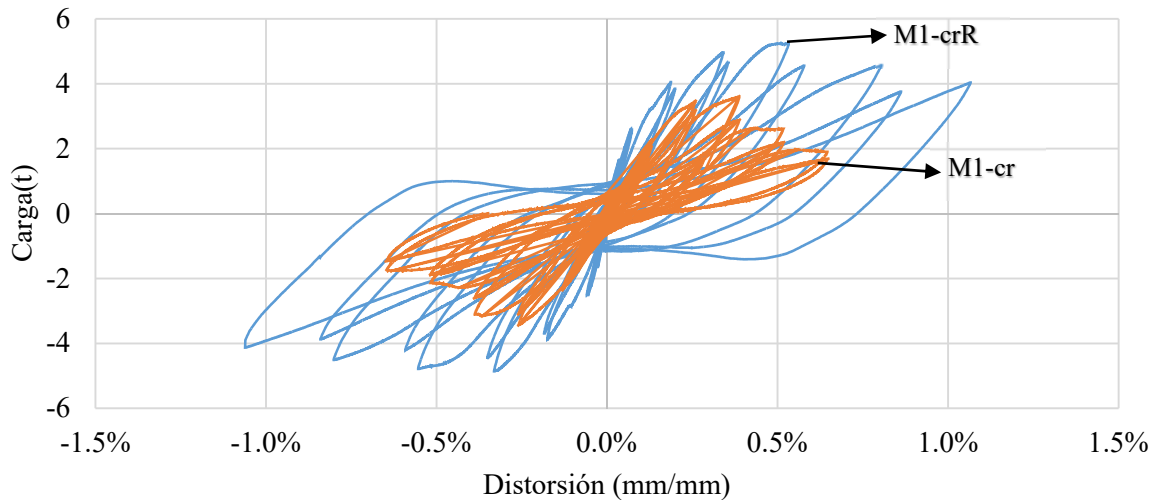
La Figura 37 muestra la curva de histéresis resultante del ensaye del muro rehabilitado M1-crR. Los resultados de la prueba mostraron que la técnica de rehabilitación empleada permitió que el muro soportara un nivel de distorsión de 1.06% y la resistencia máxima ante cargas laterales de 5.2 t. Otro aspecto importante es que el modelo rehabilitado tuvo más capacidad de disipación de energía lo que se puede deducir a partir del área dentro de los ciclos de histéresis.



**Figura 37. Curva de histéresis del modelo M1-crR**

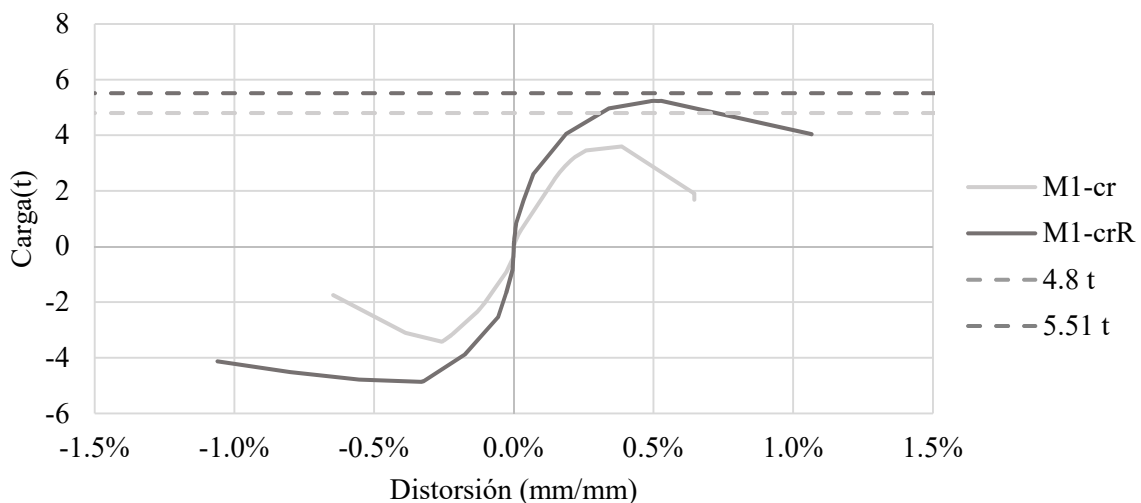
#### 4.2.4. Comparación de curvas de histéresis y sus envolventes

La Figura 38 muestra las curvas de histéresis de ambos modelos. Se muestra que para el muro reforzado se lograron cargas y deformaciones mayores que para el modelo original. Esto significa que postergo el daño. También, se puede inferir que el área de histéresis del modelo M1-crR es mucho mayor que la del modelo M1-cr, por lo que el modelo reforzado con malla de fibra disipa más energía por ciclo que el modelo original.



**Figura 38. Curvas de histéresis del modelo M1-cr y M1-crR**

En la Figura 39 se muestran las envolventes de los ciclos positivos y negativos del modelo original y rehabilitado. Se puede observar un aumento en la rigidez inicial del muro rehabilitado sobre el muro original. Otro aspecto a destacar es el aumento de la capacidad de resistencia y de deformación ante carga lateral. El modelo M1-cr tuvo una resistencia de 3.6 t, mientras que la del modelo M1-crR fue de 5.2 t. Esto significa un aumento del 45% de resistencia. Respecto a distorsión, el modelo original tuvo una distorsión de 0.64% y el modelo reforzado se llevó hasta 1.06%, por lo que el aumento fue del 65%.



**Figura 39. Envolventes del modelo M1-cr y M1-crR**

### 4.3. Resultados del ensayo en mesa vibradora

Se presentan los resultados experimentales de la prueba de mesa vibradora. Se explican los modos de falla de la estructura, las relaciones carga-desplazamiento, envolventes, funciones de transferencia, propiedades dinámicas y los perfiles de deformación. Es importante aclarar que muchos de los resultados presentes en esta sección están en función de la aceleración máxima medida en la base, que se denota como  $a_{base}$ .

#### 4.3.1. Modos de falla de la estructura

Se aplicó el acelerograma sintético mostrado en la Figura 24 escalando la intensidad según la sección 3.3.3 hasta llegar a un estado de daño severo. El mecanismo de falla en el modelo original está asociado a una falla por tensión diagonal. En la Figura 40 se aprecian grietas a lo largo de las juntas, una característica típica de este modo de falla. También, se aprecia que las grietas se extendieron a los castillos, fracturándolos y, en consecuencia, reduciendo su capacidad de confinamiento.



**Figura 40. Modo de falla del modelo original**

En la prueba del modelo rehabilitado se aplicó el mismo acelerograma sintético de la Figura 24. Igual que en el modelo original se varió la intensidad sísmica. Según se describe en la Tabla C2 (Ver apéndice C) para una intensidad del 25%, 75%, 100% y 150% no se observó daño aparente en el modelo. Enseguida, se aplicó el acelerograma a una intensidad del 200% y se presentó daño en el modelo. Se realizaron incrementos del 50% hasta que se aplicó el acelerograma a una intensidad del 650%.

En la Figura 41 se muestran imágenes de la condición final de daño del modelo rehabilitado. Aparecieron grietas con una inclinación aproximada de  $45^\circ$ , indicativo al modo de falla por tensión diagonal, aunque el modo principal de falla del modelo fue por deslizamiento en la base y flexo compresión en los castillos. El segundo nivel no presentó algún daño significativo a lo largo de la prueba. El modelo cambió de tener un modo de falla principal por tensión diagonal y deslizamiento a la mitad de los muros, a un modo combinado de deslizamiento en la base y flexo-compresión en las bases de los castillos.



**Figura 41. Modo de falla del modelo rehabilitado**

Es importante aclarar que la ubicación de las grietas del modelo original y aquellas del modelo rehabilitado fue diferente. Mientras que en el modelo original (Figura 40) presentó, en los muros anchos del primer nivel, una grieta horizontal a la mitad de la altura del muro, seguida de grietas inclinadas hacia los extremos; el modelo rehabilitado (Figura 41) presentó agrietamiento inclinado menor, seguido de deslizamiento en la base y falla por flexo-compresión en los castillos. El ancho máximo de grietas en el modelo original fue cercano a 5 mm, mientras que en el modelo rehabilitado fue de 2 mm.

La Figura 42 muestra que el daño se concentró en los elementos confinantes, que sufrieron aplastamiento del concreto sin fracturar el refuerzo longitudinal ni transversal.



**Figura 42. Daño en extremo inferior de los castillos**

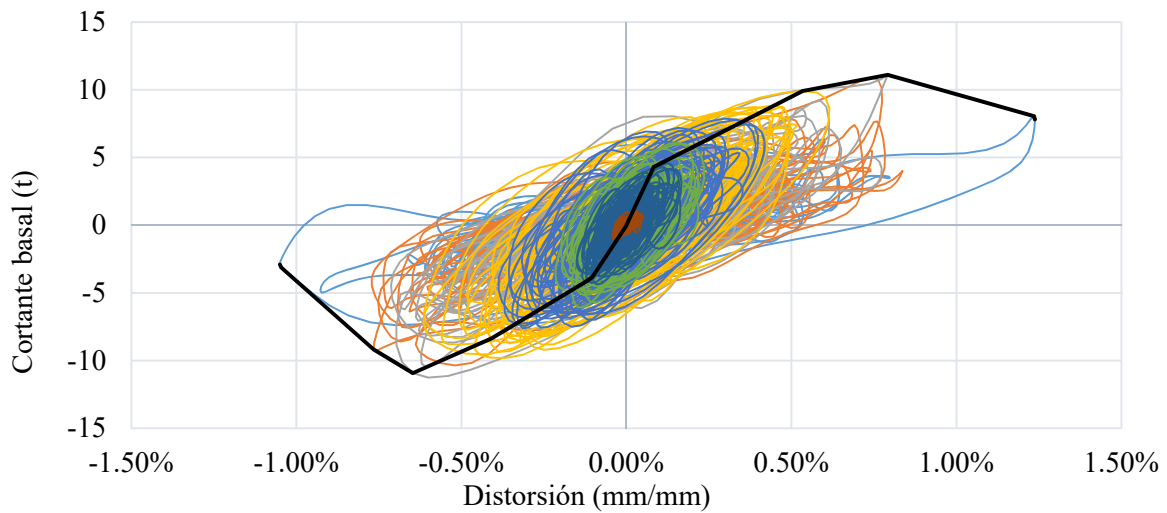
Es interesante observar que el daño en el muro ensayado de manera aislada, original y rehabilitada, es muy similar al observado en las pruebas en mesa vibradora.

#### **4.3.2. Relaciones carga-desplazamiento y envolventes (modelo edificio)**

En la Figura 43 se muestra las curvas de histéresis del modelo original del primer nivel de todos los movimientos aplicados durante la prueba. Se observa que el modelo alcanzó una distorsión máxima de

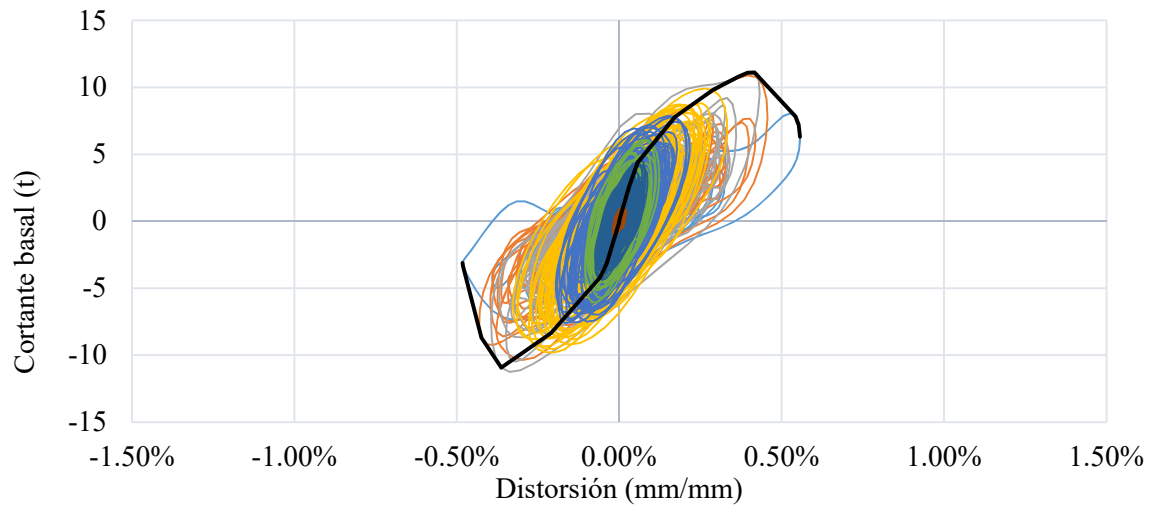


1.13%, correspondiente a una intensidad del 1.31 g y a un cortante basal máximo de 11 t correspondiente a una intensidad de 1.23 g.



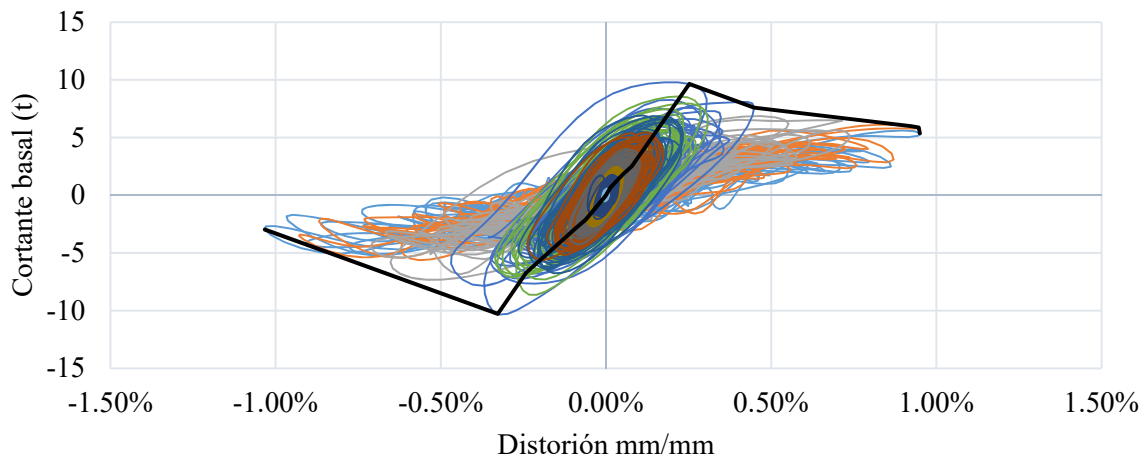
**Figura 43. Curva de histéresis del modelo original (N1)**

La Figura 44 muestra la curva de histéresis del M3N a nivel de azotea y se observa una distorsión máxima de 1.44%.



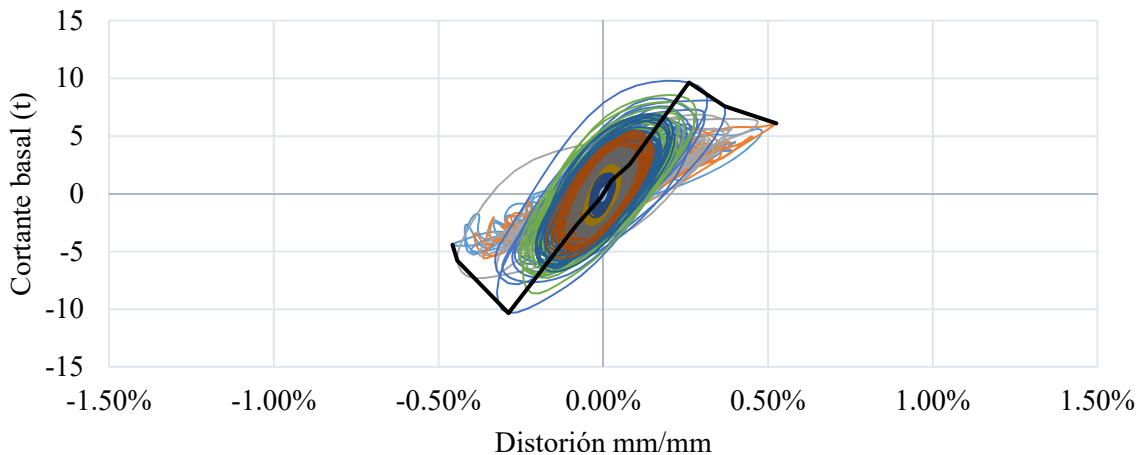
**Figura 44. Curva de histéresis del modelo original (Azotea)**

Ahora, en la Figura 45 se muestra las curvas de histéresis del modelo rehabilitado del primer nivel de todos los movimientos aplicados durante la prueba. Se observa que el modelo alcanzó un nivel de distorsión máximo de 1.04% correspondiente a una intensidad del 1.27 g y cortante basal máximo de 10.4 t para una intensidad de 1.12 g.



**Figura 45. Curva de histéresis del modelo rehabilitado (N1)**

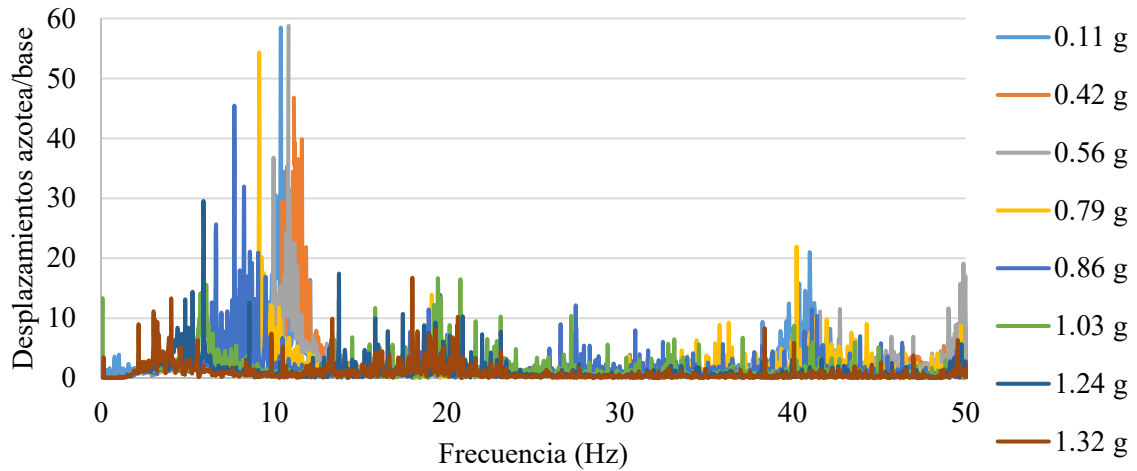
En la Figura 46 se muestra la histéresis del modelo M3N-R a nivel de azotea. La distorsión máxima de azotea fue de 0.46% correspondiente a una intensidad 1.27 g y un cortante basal máximo de 10.4 t para una intensidad de 1.12 g.



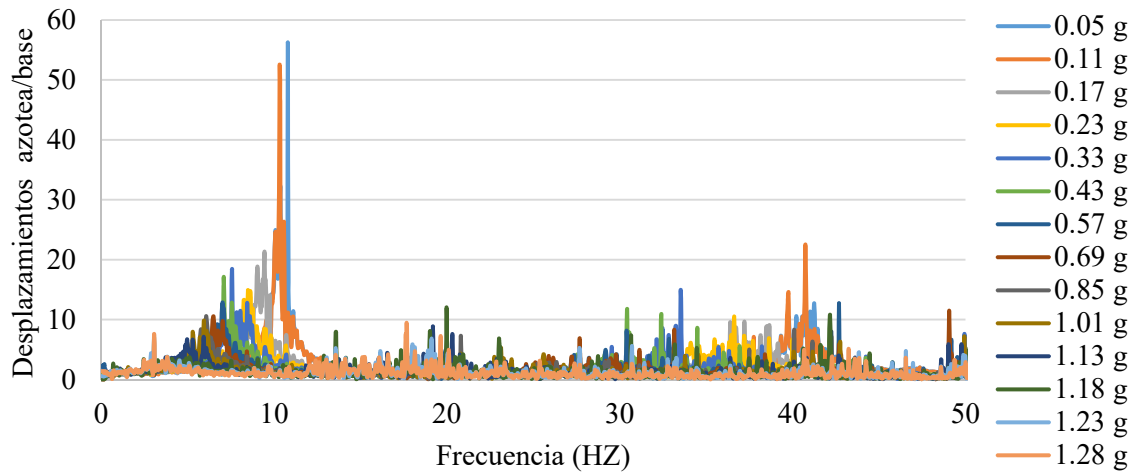
**Figura 46. Curva de histéresis del modelo rehabilitado (Azotea)**

#### 4.3.3 Funciones de transferencia y propiedades dinámicas

Con las aceleraciones registradas en la base y en la azotea, se calcularon los espectros de Fourier para obtener las funciones de transferencia correspondientes a cada intensidad sísmica. En la Figura 47 se observan las funciones de transferencia obtenidas para cada movimiento sísmico. En total fueron 14 intensidades sísmicas, cada uno asociado a un nivel de intensidad.



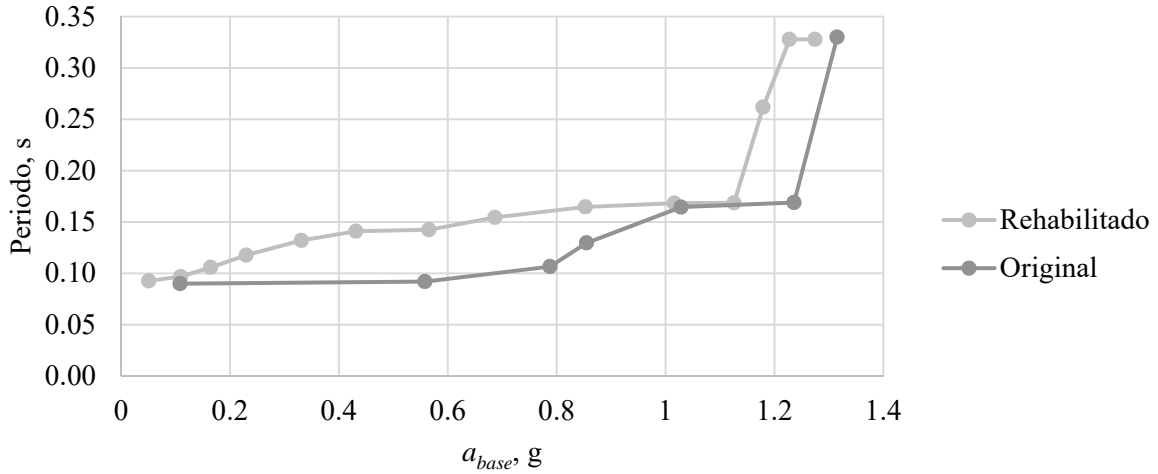
a) Modelo original



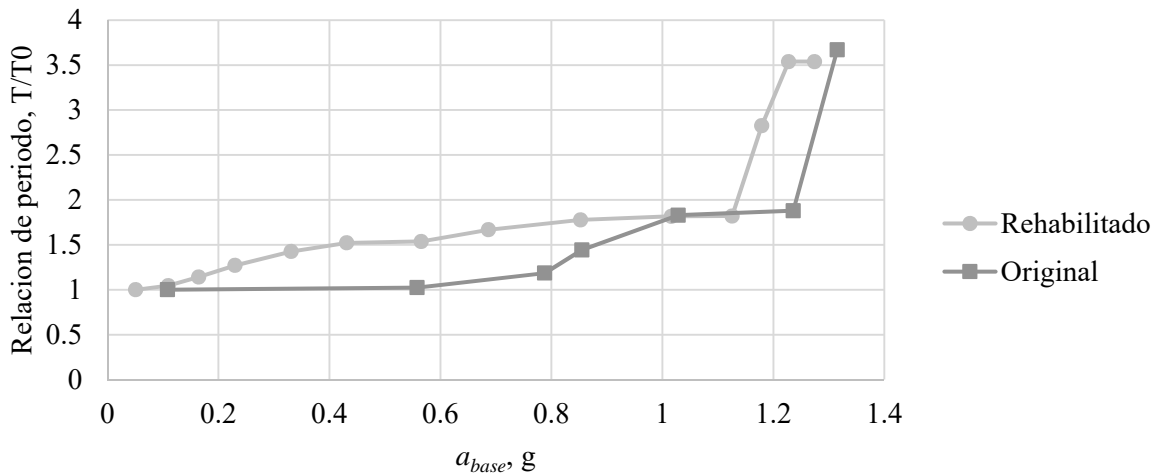
b) Modelo rehabilitado

**Figura 47. Función de transferencia Azotea/base**

En la Figura 48 se puede observar un resumen de la variación del periodo del modelo original y rehabilitado obtenido a partir de las frecuencias encontradas con las funciones de transferencia. Nótese que la variación que tiene mientras aumenta con la intensidad sísmica.



a) Variación del periodo convencional respecto a la intensidad sísmica.



b) Variación del periodo normalizado respecto a la intensidad sísmica

**Figura 48. Variación del periodo respecto a la intensidad sísmica**

En la Figura 48 se observa que el modelo original tiene un periodo inicial de 0.085 s, medido a partir del primer ruido blanco. El modelo fue acumulando daño a medida que aumentaba la intensidad sísmica en la base, hasta llegar a un valor de 0.34 s, una diferencia del 75% en comparación con el valor inicial.

El modelo rehabilitado tenía un periodo inicial de 0.09 s, medido a partir del primer movimiento sísmico aplicado. El nivel de daño y el periodo aumentaron en función de la intensidad sísmica hasta llegar a un valor final de 0.33 s, teniendo una diferencia del 72% respecto al valor inicial.

#### 4.3.4. Amortiguamiento calculado por equilibrio energético

Obtenidas las aceleraciones y los desplazamientos en el tiempo, se calculó el amortiguamiento viscoso equivalente de la estructura usando el concepto de equilibrio energético, que consiste en igualar la energía de entrada con la suma de las energías: cinética, potencial y aquella disipada por la viscosidad equivalente de la estructura. Esta última se obtuvo iterando el valor del amortiguamiento viscoso hasta lograr la igualdad descrita.

En la Figura 49 se muestran los valores del amortiguamiento, calculados por equilibrio energético, para las diferentes intensidades sísmicas aplicadas. Se puede observar que el valor del amortiguamiento fue aumentando conforme aumento la intensidad sísmica. En el modelo original, que llegó a una aceleración máxima en la base de 1.32 g, se calculó un amortiguamiento de 13.23% mientras que en el modelo rehabilitado con una aceleración máxima de 1.28 g, se calculó un amortiguamiento de 31.28%. Se aprecia un incremento significativo del amortiguamiento en el modelo rehabilitado para intensidades mayores a 1g; lo que se explica por un deslizamiento de la base, apreciable físicamente durante las pruebas.

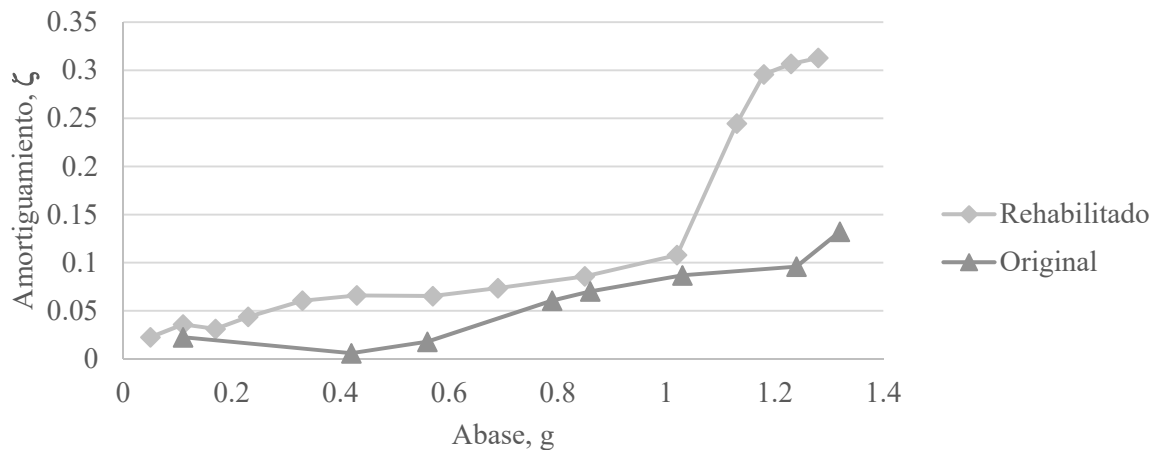
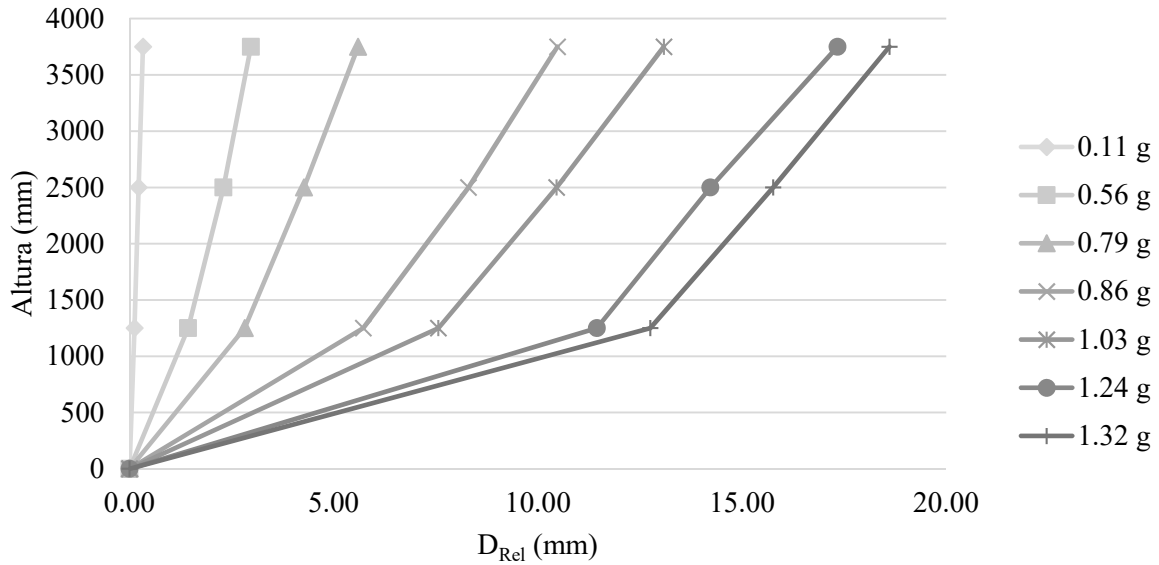


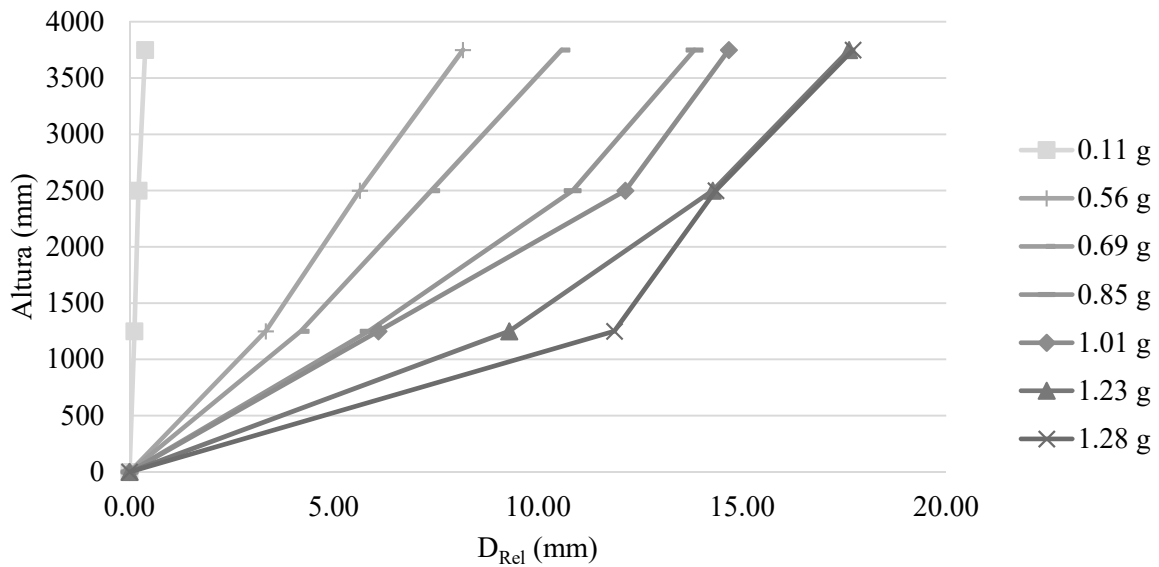
Figura 49. Variación del amortiguamiento respecto a la aceleración máxima en la base

#### 4.3.5. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso y desplazamiento relativo máximo

En las Figuras 50 y 51 se observan los perfiles de desplazamientos relativos máximos para ambos edificios, donde el modelo original tuvo un desplazamiento máximo relativo de 18.61 mm y el rehabilitado tuvo un valor máximo de 19.72 mm. Se puede apreciar que para intensidades similares, el modelo rehabilitado tiende a tener desplazamientos mayores.



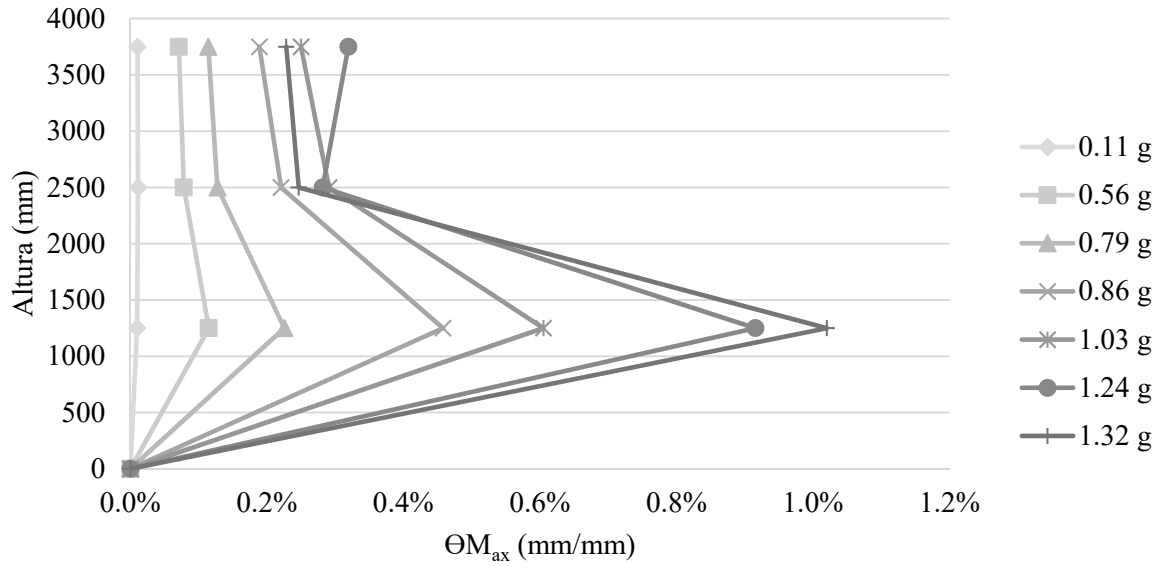
**Figura 50. Perfiles de desplazamiento máximo relativo en modelo original**



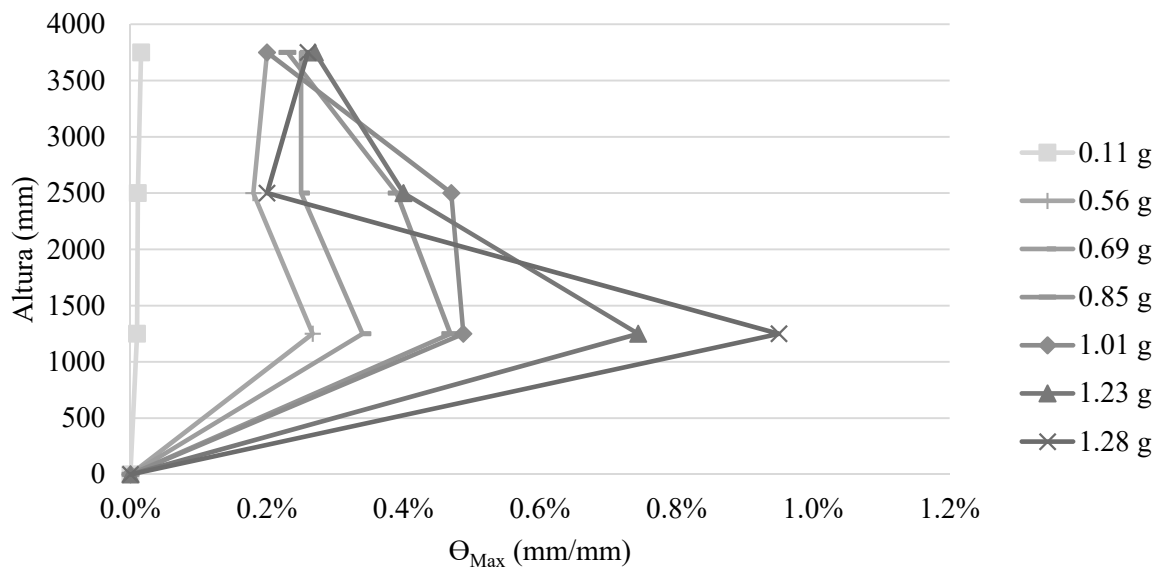
**Figura 51. Perfiles de desplazamiento máximo relativo en modelo rehabilitado**

En la Figura 52 y 53 se muestran los perfiles de distorsiones máximas de entrepiso. El modelo original tuvo un nivel de distorsión del 1.02% ante una aceleración en la base de 1.32 g, mientras que la distorsión del modelo rehabilitado es de 1.20% para una aceleración de 1.23 g.

Se puede apreciar que el modelo rehabilitado tiende a tener distorsiones de entrepiso mayores que el modelo original para intensidades sísmicas similares.



**Figura 52. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso en modelo original**



**Figura 53. Perfiles de distorsión máxima de entrepiso en modelo rehabilitado**

La Tabla 18 muestra un resumen de los resultados experimentales del modelo original para los diferentes niveles de intensidad sísmica aplicados, donde  $a_{base}$  es la aceleración en la base,  $V_{max}$ , es el cortante basal y  $\theta_{max}$  es la distorsión máxima de entrepiso. Se puede observar como aumento el periodo con forme aumenta la aceleración en la base, lo cual se puede traducir como daño en la estructura. También se aprecia que para una aceleración máxima en la base de 1.32 g, el modelo original alcanzo un nivel de amortiguamiento de 13.23% con un nivel de distorsión máximo de 1.24%.

**Tabla 18. Resumen de resultados de modelo original**

$a_{base}$ , g	Periodo, s	Amortiguamiento, $\zeta$	$V_{max}$ , kN	$\theta_{max}$ , mm/mm
0.11	0.084	2.26%	10.42	0.01%
0.42	0.095	0.59%	43.98	0.11%
0.56	0.098	1.79%	58.61	0.11%
0.79	0.12	6.06%	75.65	0.23%
0.86	0.14	7.02%	95.35	0.46%
1.03	0.19	8.69%	108.31	0.60%
1.24	0.23	9.60%	104.81	0.92%
1.32	0.34	13.23%	77.50	1.24%

La Tabla 19 muestra un resumen de los resultados experimentales del modelo M3N-R asociados a una aceleración en la base. Se puede ver el aumento del periodo con forme aumenta la aceleración en la base, lo cual se traduce como daño en el modelo. También se aprecia que para una aceleración máxima en la base de 1.28 g, el modelo original alcanzo un nivel de amortiguamiento de 31.28% con un nivel de distorsión máximo de 1.04%.

**Tabla 19. Resumen de resultados de modelo rehabilitado**

$a_{base}$ , g	Periodo, s	Amortiguamiento, $\zeta$	$V_{max}$ , kN	$\theta_{max}$ , mm/mm	Observaciones
0.05	0.09	1.95%	5.72	0.03%	Ningún daño aparente.
0.11	0.10	3.59%	5.35	0.02%	Ningún daño aparente.
0.17	0.11	3.12%	17.38	0.05%	Ningún daño aparente.
0.23	0.12	4.38%	24.28	0.06%	Ningún daño aparente.
0.33	0.13	6.05%	39.44	0.12%	Se presentó ligero desprendimiento en la base de los muros y grietas diagonales en los extremos inferiores de los castillos y verticales en cadena de desplante.
0.43	0.14	6.60%	53.50	0.24%	Se presentaron grietas inclinadas en el muro central y grietas verticales en la cadena de desplante y en los extremos del muro.
0.57	0.14	6.53%	67.85	0.27%	Empezaron a desarrollarse grietas inclinadas en los muros



					de los extremos y grietas verticales en los extremos superiores del castillo.
0.69	0.15	7.36%	84.01	0.34%	Se comenzó a concentrar el daño en los extremos inferiores de los castillos, se presentó una nueva grieta inclinadas en el muro central y se extendieron una grieta vertical y diagonal en el muro lateral.
0.86	0.16	8.58%	96.02	0.47%	Nuevas grietas inclinadas en muro lateral y se concentró más daño en el extremo inferior de los castillos.
1.02	0.17	10.79%	99.06	0.54%	Se extendieron las grietas inclinadas que aparecieron en el sismo 400%, se presentó una grieta a inclinadas en el muro central y se concentró más daño en los extremos inferiores de los castillos.
1.13	0.17	24.47%	105.80	1.18%	Se presentó una grieta inclinadas en el muro central y se extendieron algunas grietas del muro lateral y se terminaron de aplastar los extremos inferiores de los muros.
1.18	0.26	29.58%	67.28	1.20%	Se presentaron ligeras grietas en los muros laterales.
1.23	0.33	30.66%	59.92	0.95%	Hubo un modo de falla de deslizamiento en la base de los muros.
1.28	0.33	31.28%	55.07	1.04%	No se presentó más daño aparente en los muros y comenzó a disipar energía al momento de estar deslizando la base. Fin de la prueba.

## CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Después de presentar los resultados en esta tesis, se ofrece la siguiente discusión:

- Rehabilitar con malla de fibra de vidrio podría tener el inconveniente de costos elevados con respecto a otros métodos convencionales, como el refuerzo con malla de alambre soldado, en el apéndice D del apartado de anexos se aprecia una diferencia mayor del 16% del refuerzo con fibra de vidrio con respecto al refuerzo con malla de alambre soldado, por lo que, si el aspecto económico es un impedimento, la malla de fibra de vidrio podría no ser viable para fines de rehabilitación.
- Al utilizar la malla de fibra de vidrio como opción de rehabilitación para el modelo de estudio, cambió su modo de falla principal de tensión diagonal a deslizamiento en la base. Es importante mencionar que el modo de falla por deslizamiento es más dúctil que uno por tensión diagonal. Aunque la falla por deslizamiento podría tener el inconveniente de una reparación más difícil y costosa.
- Al tener un desplazamiento residual correspondiente a la falla por deslizamiento en la base, no se recomienda re-centrar la estructura a su posición original ya que los costos de rehabilitación se podrían elevar demasiado. En lugar de eso se podría aumentar la sección de la cimentación para disminuir la excentricidad ocasionada por la falla. Por otro lado, en una falla por tensión diagonal se podrían tener un desplazamiento residual fuera del plano, por lo tanto, el muro se debería recentrar antes de rehabilitarlo.
- Como lo recomienda la guía técnica de rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México (Alcocer et al., 2021), cuando la estructura se desprende de la cimentación debido a un desplazamiento producido por deslizamiento en la base, el refuerzo de la rehabilitación se debe extender hasta la cimentación. Se deberá hacer un ranurado en la cimentación para poder colocar el armado del encamisado y el mortero o el concreto. Las ranuras deberán tener distintas profundidades a lo largo del muro con el fin de formar una llave de corte para incrementar la resistencia a deslizamiento del muro. La desventaja de rehabilitar una estructura que falló por deslizamiento es que el cortante en la base lo resistirá únicamente el refuerzo del encamisado.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar la efectividad del mortero reforzado con fibra de vidrio como técnica de rehabilitación. Con base a los resultados experimentales, se puede concluir lo siguiente:

- Se observó una diferencia mayor del 48% de la resistencia predicha del modelo M1-cr con las ecuaciones de la norma con respecto a la obtenida del ensaye. Por otro lado, en el modelo rehabilitado (M1-crR) se apreció una diferencia mayor del 4% de la resistencia calculada con la ecuación para calcular el cortante por fricción y la obtenida del ensaye. Al utilizar las ecuaciones de la norma con valores medios de las resistencias de los materiales, se intenta predecir un valor medio de la resistencia del muro. La variación existente entre la resistencia calculada y la resultante del ensaye del modelo M1-cr no quiere decir que los resultados sean incorrectos, ya que las ecuaciones de las normas se calibran con base en tendencias centrales de muchos ensayes experimentales.
- El modelo M1-cr pasó de tener un modo de falla por deslizamiento y compresión diagonal a la mitad de la altura del muro, a uno combinado por deslizamiento en la base y flexo-compresión en los castillos después de la rehabilitación. En el modelo rehabilitado se presentaron grietas con una distribución más uniforme en dirección a las diagonales del muro que en el modelo original, aunque se empezó a presentar desprendimiento del encamisado entre el muro y el material de reforzamiento para distorsiones superiores a 0.01, producidas por concentración de esfuerzos en las bases del muro.
- Con la técnica de rehabilitación se aumentó la resistencia ante cargas laterales en 45% y los niveles de distorsión se duplicaron.
- En las pruebas en mesa vibradora, se observó un cambio en el modo de falla, pasando de deslizamiento y tensión diagonal en el modelo original a un modo de falla por deslizamiento en la base y flexo compresión en los castillos en el modelo rehabilitado gracias a la técnica usada. Esto resultó favorable, ya que el cambio del modo de falla significó un aumento significativo de la resistencia en la zona afectada previamente. Una vez rehabilitado el muro, la falla se presentó en la siguiente zona más débil.
- El modelo original empezó con un periodo de 0.09 s y terminó con un periodo de 0.33 s, mientras que el modelo rehabilitado no sólo recuperó su rigidez, sino que la superó, alcanzando un periodo inicial de 0.08 s, para llegar a un periodo final de 0.34 s.
- El modelo original alcanzó un nivel de distorsión máxima de entrepiso de 1.15% para una aceleración en la base de 1.32 g; mientras que el modelo rehabilitado alcanzó una distorsión máxima de 1.04% para una aceleración en la base de 1.28 g.
- Para valores similares de aceleración las distorsiones de entrepiso fueron menores en el modelo rehabilitado. Por otra parte, el modelo original alcanzó un valor de amortiguamiento equivalente máximo del 13.2% mientras que el rehabilitado llegó a 31.3%. El incremento de amortiguamiento equivalente se atribuye a la fricción que se generó en la base por el deslizamiento de los muros.

- Según los resultados de pruebas en pilas y muretes, la resistencia a compresión de la mampostería no aumentó significativamente por la técnica de rehabilitación, aunque su resistencia a tensión diagonal sí tuvo un incremento significativo. En los resultados existe variación considerable, aunque se observó un aumento por lo menos del doble a la resistencia original, por lo que la fibra de vidrio como material de rehabilitación se puede considerar como una opción viable para incrementar la resistencia a cortante en muros de mampostería, ya que su principal función es la de aumentar la resistencia a tensión diagonal del material.
- La fibra de vidrio, como solución a la rehabilitación de estructuras es una solución viable, ya que es un material con una resistencia alta a la tensión y es resistente a la corrosión. Durante las pruebas se observó un aumento del 45% a la resistencia para cargas laterales y un 65% a su capacidad de deformación ante cargas laterales. Dicho esto, la fibra de vidrio es un sustituto aceptable al acero de refuerzo ya que aumenta la resistencia a tensión del material base.

## **6.2. Recomendaciones**

Para trabajos futuros, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Someter a pruebas experimentales más modelos con otras técnicas de rehabilitación, incluyendo otros tipos de fibras y con diferentes cuantías.
- De ser posible, ensayar modelos a escala real de muro aislado y realizar comparación con los resultados obtenidos en este trabajo.
- Ensayar e instrumentar un mayor número de muestras de materiales para tener una mayor confiabilidad en los resultados.

## REFERENCIAS

- Alcocer, S. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Vol. 1, pp. 164-191.
- Alcocer et al (2021), Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. Guía técnica, Ciudad de México.
- Arias, J.G. (2005). Ensayos en mesa vibradora de un modelo a escala 1:2 de edificio de mampostería confinado de tres niveles. Tesis de maestría. Posgrado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 200 pp.
- Ávila, O., Carrillo, J., Alcocer, S. M. (2011). Rehabilitación de muros de concreto usando CRFA: Ensayos en mesa vibradora. Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo. Vol 2, pp 2-17.
- Carmona, S., Cabrera, M. (2009). Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero. Revista de ingeniería de construcción. Vol 24, pp 74-94.
- Colombi, Poggi. (2016), Tests for the characterization of reinforcement system for masonry elements, politécnico de Milán, departamento de ingeniería estructural, Cod. Fiscale 80057930150.
- Fancher, N. (1997). External strengthening with FRP composites. Concrete Repair Bulletin, International Concrete Repair Institute, pp. 13-21.
- Flores, L. E., Pacheco, M. A., Carrillo, J. (2012). Rehabilitación de muros de mampostería de piezas multiperforadas reforzados con mortero con fibras o con mortero y malla de alambre. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.
- Gómez, B., Jean, R., Pérez, J.A., Treviño, E.L. Editores (2019) Edificaciones de Mampostería. Editorial Limusa. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. México.
- Haddad, M.A., Shaheen, E., Pasekian, G.A., Tilleman, D., Shrive, N.G. (2010). Strengthening of a concrete masonry wall subject to lateral load with sprayed glass-fibre-reinforced polymer. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol 37, pp 1315-1330.
- Kasanagi, H., Kameswara, R. (2018). Effect of graded fibers on stress strain behaviour of Glass Fiber Reinforced Concrete in tension. Construction and Building Materials. Vol 183, pp 592-604.
- Khanlou, A., MacRae, G. A., Scott, A. N., Hicks, S. J., Clifton, G. C. (2013). Shear performance of Steel fibre-reinforced concrete. Steel Innovations conference 2013. Vol 49, pp 400-407.
- NTC-DCEM. (2017). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería. Ciudad de México, México.
- NTC-DCEC. (2017). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto. Ciudad de México, México.
- Páez, D.F., Parra, S.X., Montaña, C.F. (2009). Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. Reviste de Ingenierías Universidad de Medellín. Vol 8, pp. 51-69.
- Shaheen, E. & Shrive, N. (2007). Sprayed glass fibre reinforced polymer masonry columns under concrete and eccentric loading. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol 34, pp 16-21.
- Soto, E.M. (2008). Rehabilitación de estructuras de concreto. Tesis de maestría. Posgrado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 107 pp.

## APÉNDICE A. Ficha técnica del mortero de rehabilitación.

Se presenta la ficha técnica del mortero utilizado para la rehabilitación de los modelos. Se observa que la resistencia a compresión del mortero debe ser aproximadamente de 22 MPa, lo que es consistente con las pruebas realizadas en este trabajo.

### PRODUCT INFORMATION

Packaging	25 kg bag
Appearance / Colour	Grey powder
Shelf life	12 months from date of production
Storage conditions	The product must be stored properly in original sealed packaging, complying with all usual cement product storage requirements.
Density	Density of hydrated mix: $1.85 \pm 0.05$ kg/L Density of dry product: $\sim 1400$ kg/m <sup>3</sup> (EN 1015-10)
Maximum Grain Size	D <sub>max</sub> = 1.4 mm
Soluble Chloride Ion Content	$\sim 0.005$ % (EN 1015-17)

### TECHNICAL INFORMATION

Compressive Strength	Class R2 (EN 1504-3)
	Class CS IV (EN 998-1)
	Class M20 (EN 998-2)
	$\sim 22$ MPa (EN 12190)
	$\sim 22$ MPa (EN 1015-11)
	<u>1 day</u> <u>7 days</u>
	<u><math>\sim 5</math> MPa</u> <u><math>\sim 17</math> Mpa</u>
Modulus of Elasticity in Compression	$\sim 7.6$ GPa (UNI EN 13412)
Tensile Strength in Flexure	$\sim 6$ MPa (EN 1015-11)
Tensile Adhesion Strength	$\sim 1.6$ MPa (B) (EN 1542)
	0.15 MPa (tabulated value) (EN 1052-3)
	$\sim 0.8$ MPa (FP: A) (EN 1015-12)
Thermal Compatibility	Freeze thaw (50 cycles) $\sim 1.22$ MPa (EN 13687-1)
Reaction to Fire	Euroclass A2 (EN 13501-1)
Permeability to Water Vapour	$\mu$ 15/35 (EN 1742 A.12)
	$\mu \sim 135$ (EN 1015-19)
Capillary Absorption	Class W2 (EN 998-1)
	$\sim 0.45$ kg m <sup>-2</sup> h <sup>-0.5</sup> (EN 13057)
	$\sim 0.2$ kg m <sup>-2</sup> min <sup>-0.5</sup> (EN 1015-18)
Water penetration after capillary absorption	$\sim 3.00$ mm (EN 1015-18)
Thermal Conductivity	$\sim 0.83$ W/mK (EN 1745 A.12)

Figura A1. Ficha técnica de mortero Sika MonoTop – 722 Mur

## APÉNDICE B. Ficha técnica de la malla de fibra de vidrio.

Se presenta la ficha técnica de la malla de fibra de vidrio utilizado para la rehabilitación de los modelos. Se observa que la resistencia a tensión en sentido longitudinal es de 77 kN/m.



# PRODUCT DATA SHEET

## SikaWrap®-350 G Grid

ALKALI RESISTANT GLASS FIBRE GRID FOR TEXTILE REINFORCED MORTARS

### DESCRIPTION

SikaWrap®-350 G Grid is a glass fibre, bi-directional grid, protected with an alkali resistant coating. Part of the Sika MonoTop®-722 Mur textile reinforced mortar system.

### USES

Embedded as reinforcement into Sika MonoTop®-722 Mur mortar and used for:

- Reinforcing masonry walls made of brick, blocks or stone
- Reinforcing infill masonry walls
- Connecting masonry walls to other walls or to reinforced concrete structures
- Increasing the resistance to out-of-plane failure of masonry walls subject to horizontal earthquake action
- Increasing the in plane resistance and ductility of masonry walls subject to horizontal earthquake action
- Repair of cracked masonry walls
- Interior or exterior use

### PRODUCT INFORMATION

<b>Construction</b>	<b>Fibre orientation</b> 0° / 90° Grey alkali resistant SBR coating Stitch spacing: 18,2 × 14,2 mm (centre to centre)
<b>Fibre Type</b>	E-glass fibre
<b>Packaging</b>	<b>Roll width</b> 1,0 m <b>Roll length</b> 50 m
<b>Shelf life</b>	24 months from date of production
<b>Storage conditions</b>	The product must be stored in original, unopened and undamaged packaging in dry conditions at temperatures between +5 °C and +35 °C. Always refer to packaging.
<b>Dry Fibre Density</b>	2,6 g/cm <sup>3</sup>

### CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

- High tensile resistance in both directions
- Economical
- Corrosion resistant
- Alkali resistant coating

### APPROVALS / CERTIFICATES

- Tensile Strength and Elongation tests ETAG 004, SikaWrap®-350 G Grid, Sika, Report
- Tensile Strength, Pull-off tests, SikaWrap®-350 G Grid, Politecnico di Milano, Report No. 80057930150

Area Density	Glass fibre		With coating
	Total	280 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	360 g/m <sup>2</sup> ± 3 %
	Warp (longitudinal):	145 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	—
	Weft (transverse):	135 g/m <sup>2</sup> ± 5 %	—
Dry Fibre Tensile Strength	2600 N/mm <sup>2</sup> (measured on roving)		
Dry Fibre Modulus of Elasticity in Tension	> 80 000 N/mm <sup>2</sup>		
<b>TECHNICAL INFORMATION</b>			
Tensile Resistance	Warp (longitudinal)	~77 kN/m	
	Weft (transverse)	~76 kN/m	
<p>Note:</p> <p>The above values are typical and indicative only. Effective values depend on the quality of application and the type of tensile testing procedure. Apply material reduction factors according to the relevant design standard.</p>			
<b>SYSTEMS</b>			
System Structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SikaWrap<sup>®</sup>-350 G Grid</li> <li>• Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur</li> </ul>		

## APPLICATION INSTRUCTIONS

### SUBSTRATE QUALITY

Refer to the Sika Method Statement: Textile reinforced Mortar and Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur Product Data Sheet

### SUBSTRATE PREPARATION

Refer to the Sika Method Statement: Textile reinforced Mortar and Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur Product Data Sheet

### APPLICATION METHOD / TOOLS

Apply the first layer of Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur mortar (5 mm minimum) to the prepared substrate. Embed SikaWrap<sup>®</sup>-350 G Grid into the 1<sup>st</sup> wet layer of mortar.

While the first layer is still wet, apply a 2<sup>nd</sup> layer of mortar (~5 mm) to completely cover the SikaWrap<sup>®</sup>-350 G Grid.

Finish the surface of the 2<sup>nd</sup> layer of mortar according to project requirements using wooden or plastic float. Also refer to the Sika Method Statement: Textile reinforced Mortar and Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur Product Data Sheet

## FURTHER INFORMATION

- Sika Method Statement: Textile reinforced Mortar
- Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur Product Data Sheet

## IMPORTANT CONSIDERATIONS

- Reference must be made to the Sika Method Statement: Textile reinforced Mortar and Sika<sup>®</sup> MonoTop<sup>®</sup>-722 Mur Product Data Sheet

## BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

## LOCAL RESTRICTIONS

Note that as a result of specific local regulations the declared data and recommended uses for this product may vary from country to country. Consult the local Product Data Sheet for the exact product data and uses.

Figura B1. Ficha técnica de malla de fibra de vidrio SikaWrap – 350 G Grid



## APÉNDICE C. Bitácoras de pruebas original y rehabilitado

Se presentan las bitácoras de prueba del modelo original y rehabilitado, donde se observa la intensidad sísmica a la que se llevó el espécimen, la descripción y las observaciones.

**Tabla C1. Bitácora de prueba modelo original**

Núm.	$a_{bases}$ g	Descripción	Observaciones
1	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
2	0.11	Registro sísmico sintético al 20%	Sismo 20%
3	0.42	Registro sísmico sintético al 75%	Sismo 75%
4	0.56	Registro sísmico sintético al 100%	Sismo 100%
5	0.79	Registro sísmico sintético al 150%	Sismo 150%
6	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
7	0.86	Registro sísmico sintético al 250%	Sismo 250%
8	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
9	1.03	Registro sísmico sintético al 350%	Sismo 350%
10	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
11	1.24	Registro sísmico sintético al 450%	Sismo 450%
12	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
13	1.32	Registro sísmico sintético al 500%	Sismo 500%
14	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.

**Tabla C2. Bitácora de prueba modelo rehabilitado**

Núm.	$a_{bases}$ g	Descripción	Observaciones
1	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
2	0.05	Registro sísmico sintético al 25%	Sismo 25%, ningún daño aparente
3	0.11	Registro sísmico sintético al 75%	Sismo 75%, ningún daño aparente
4	0.17	Registro sísmico sintético al 100%	Sismo 100%, ningún daño aparente
5	0.23	Registro sísmico sintético al 150%	Sismo 150%, ningún daño aparente
6	0.33	Registro sísmico sintético al 200%	Sismo 200%, se presentó ligero desprendimiento en la base de los muros y grietas diagonales en los extremos inferiores de los castillos y verticales en la cadena de desplante.
7	0.43	Registro sísmico sintético al 250%	Sismo 250%, se presentaron grietas a 45° en el muro central y grietas verticales en la cadena de desplante y en los extremos del muro.
8	0.57	Registro sísmico sintético al 300%	Sismo 300%, empezaron a desarrollarse grietas a 45° en los muros de los extremos y grietas verticales en los extremos superiores del castillo.
9	0.69	Registro sísmico sintético al 350%	Sismo 350%, se comenzó a concentrar el daño en los extremos inferiores de los

			castillos, se presentó una nueva grieta a 45° en el muro central y se extendieron una grieta vertical y diagonal en el muro lateral.
10	0.86	Registro sísmico sintético al 400%	Sismo 400%, aparecieron grietas nuevas a 45° en el muro lateral y se concentró más daño en el extremo inferior de los castillos.
11	1.02	Registro sísmico sintético al 450%	Sismo 450%, se extendieron las grietas a 45° que aparecieron en el sismo 400%, se presentó una grieta a 45° en el muro central y se concentró más daño en los extremos inferiores de los castillos
12	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal. No se movió la mesa
13	1.13	Registro sísmico sintético al 500%	Sismo 500%, se presentó una grieta a 45° en el muro central y se extendieron algunas grietas del muro lateral y se terminaron de aplastar los extremos inferiores de los muros
14	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
15	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
16	1.18	Registro sísmico sintético al 550%	Sismo 550%, se presentaron ligeras grietas en los muros laterales
17	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
18	1.23	Registro sísmico sintético al 600%	Sismo 600%, hubo un modo de falla de deslizamiento en la base de los muros
19	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.
20	1.28	Registro sísmico sintético al 650%	Sismo 650%, no se presentó más daño aparente en los muros y comenzó a disipar energía al momento de estar deslizándose la base. Fin de la prueba
21	RB-20	Ruido blanco RMS de 20 Gal	Ruido blanco 20 Gal.

**APÉNDICE D. Precios unitarios de refuerzo con malla de alambre soldado y malla de fibra de vidrio**

Se presenta los precios unitarios del refuerzo con malla de alambre y con malla de fibra de vidrio, integrados con costos de materiales cotizados en julio de 2021.

**Tabla D1. Precio unitario del refuerzo con malla de alambre soldado**

<b>PRECIO UNITARIO DE REFUERZO DE MURO CON MORTERO CEMENTO-ARENA 1:3 Y MALLA ELECTROSOLDADA 6-6/10-10</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO</b>	<b>IMPORTE C.D.</b>
<b>1. MATERIAL</b>				
1.1. CEMENTOS GRIS NORMAL TIPO I (EN SACOS DE 50 KG.)	kg	13.00	\$5.00	\$65.00
1.2. ARENA DE RÍO	m3	0.03	\$290.00	\$9.57
1.3. AGUA	m3	0.01	\$80.00	\$0.67
1.4. MALLA ELECTROSOLDADA 6-6/10-10	m2	1.00	\$32.13	\$32.13
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
2.1 PEÓN	Jor	0.08	\$350.00	\$26.25
2.2 OFICIAL ALBAÑIL	Jor	0.08	\$690.00	\$51.75
<b>3 HERRAMIENTA Y EQUIPO</b>				
3.1 HERRAMIENTA MENOR	(%)mo	0.03	\$78.00	\$2.34
3.2 EQUIPO DE SEGURIDAD	(%)mo	0.02	\$78.00	\$1.17
3.3 ANDAMIO FORMADO POR DOS CABALLETES DE 1.10 MTS, PARA UTILIZARSE EN TRABAJOS DE ALBAÑILERÍA	PzaU	2	\$19.53	\$39.06
<b>TOTAL</b>				\$227.94

**Tabla D2. Precio unitario del refuerzo con malla de fibra de vidrio**

<b>PRECIO UNITARIO DE REFUERZO DE MURO CON MALLA DE FIBRA DE VIDRIO</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO</b>	<b>IMPORTE C.D.</b>
<b>1. MATERIAL</b>				
1.1. MORTERO SIKA MONOTOP – 722 MUR (SACO 25 KG)	kg	6.00	\$20.00	\$120.00
1.3. AGUA	m3	0.01	\$80.00	\$0.67
1.4. MALLA DE FIBRA DE VIDRIO SIKAWRAP – 350 G GRID	m2	1.00	\$64.26	\$64.26
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
2.1 PEÓN	Jor	0.04	\$350.00	\$13.13
2.2 OFICIAL ALBAÑIL	Jor	0.04	\$690.00	\$25.88
<b>3 HERRAMIENTA Y EQUIPO</b>				
3.1 HERRAMIENTA MENOR	(%)mo	0.03	\$39.00	\$1.17
3.2 EQUIPO DE SEGURIDAD	(%)mo	0.02	\$39.00	\$0.59
3.3 ANDAMIO FORMADO POR (DOS) CABALLETES DE 1.10 MTS, PARA UTILIZARSE EN TRABAJOS DE ALBAÑILERÍA	Pza	2	\$19.53	\$39.06
<b>TOTAL</b>				\$264.74