



## **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA SIMPLE REFORZADO CON TRM.**

*D. Nova Araneda<sup>1</sup>, C. Oyarzo Vera<sup>2</sup> & F. Sanhueza Espinoza<sup>3</sup>.*

**RESUMEN:** En el presente documento se caracteriza el comportamiento de un muro de albañilería con dimensiones 2.4 [m] de largo x 1.8 [m] de alto y 0.14 [m] de espesor construido con ladrillo fiscal. Este muro fue reforzado con TRM para realizar ensayos de cargas cíclicas de amplitud creciente en dirección horizontal paralela al muro. El ensayo aplicado al muro fue controlado por desplazamiento y ejecutado por un actuador en el coronamiento del muro. Durante los ensayos se observan grietas y fallas por adherencia a partir de los 4 [mm] de desplazamiento, a partir de los 18[mm] el espécimen tiende a rotar y el máximo desplazamiento alcanzado fue de 26[mm] observándose aplastamiento en una de sus esquinas. Durante el ensayo no se observaron daños en el plano del muro.

Al final de este estudio, los resultados se comparan con los datos obtenidos de un ensayo similar ejecutado sobre un muro reforzado con malla electrosoldada (WWM). A partir de este análisis comparativo se determina que el refuerzo usando con malla TRM aumenta la rigidez permitiendo mayores tensiones en deformaciones pequeña de forma contraria al refuerzo con malla electrosoldada.

**PALABRAS CLAVES:** TRM, albañilería simple, ciclo de carga.

**ABSTRACT:** This paper characterizes the behavior of a masonry wall with dimensions 2.4 [m] long x 1.8 [m] high and 0.14 [m] thick built with solid bricks. This wall was reinforced with TRM to perform cyclic load tests of increasing amplitude in a horizontal direction parallel to the wall. The test applied to the wall was displacement controlled and performed by an actuator at the top of the wall. During the tests, cracks and adhesion failures are observed starting at 4 [mm], at 18 [mm] the specimen tends to rotate, and the maximum displacement reached by the test was 26 [mm] causing a crushing failure at one of its corner. No damage to the wall plane was observed during the tests.

At the of this study, the results are compared with the data obtained from a similar test performed on a wall reinforced with welded wire mesh (WWM). From this comparative analysis it determined that the reinforcement using TRM mesh increases the stiffness allowing higher stresses in small deformations contrary to the reinforcement with WWM.

**KEYWORDS:** TRM, simple masonry, load cycle.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. [dnovaa@ing.ucsc.cl](mailto:dnovaa@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. [coyarczov@ucsc.cl](mailto:coyarzov@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. [franksanhueza@ucsc.cl](mailto:franksanhueza@ucsc.cl)



## 1. INTRODUCCIÓN

La albañilería es un método constructivo muy utilizado a nivel mundial en la construcción de obras civiles, este abarca infraestructuras históricas utilizando rocas naturales y hoy en la actualidad el uso de bloques de hormigón o ladrillos de distinta procedencia, esto implica distintos procesos constructivos como así también formas de reparación de infraestructuras dañadas por deterioro o efectos naturales adversos tal como los sismos por lo que se requiere de métodos de reparación para conservación de estos.

Cuando se habla de métodos constructivos asociados a la albañilería, es necesario diferenciar entre 3 técnicas: (i) la albañilería simple o tradicional utiliza solo ladrillo adheridos con mortero siguiendo una secuencia de ensamble predefinida; (ii) la albañilería armada [1] incorpora barras de acero dispuestas de forma horizontal y vertical, para lo cual se requiere la utilización de ladrillos huecos o perforados; y (iii) la albañilería confinada [2] utiliza elementos de borde verticales y horizontales de hormigón armado (pilares y cadenas) que rodean al paño de albañilería.

Registros históricos demuestran que los edificios de albañilería no reforzados representan una significativa parte de la arquitectura patrimonial a nivel mundial, pero lamentablemente también presentan una alta vulnerabilidad sísmica como ha quedado en evidencia en terremotos recientes.

En Chile se realizó un estudio a iglesias históricas construidas con albañilería no reforzada ubicadas en valle central donde se evaluó el daño y fragilidad sísmica de un total de 106 iglesias antiguas, posterior al terremoto del Maule de 2010 [3]. En dichas construcciones, los daños observados están correlacionados con fallas recurrentes de estructuras no reforzadas dejando en evidencia la vulnerabilidad estructural en las edificaciones construidas de adobe y las de albañilería simple de ladrillo previas a 1940.

Investigaciones [4] han revelado que las fallas que se manifiestan después de un sismo son directamente proporcionales al esfuerzo que se le esté aplicando al muro, pero también dependen de la distribución y ubicación de los muros dentro de una vivienda. Los modos de fallas más comunes en este tipo de infraestructuras son por deslizamiento por corte, fricción por corte, tensión diagonal y tensión por flexión y aplastamiento. Otros estudios [5] han logrado incluso predecir los tipos de fallas en muros bajo cargas de gravedad constantes y ciclos de cargas en el plano que aumentan progresivamente dando a conocer los modos por falla cortante, desplazamiento, balanceo y aplastamiento.

Dada la consecuencia de los daños ocasionados por los sismos a los muros de albañilería simple se han investigado diferentes formas de reparación que restituyan la resistencia, rigidez y durabilidad de las infraestructuras. Por ejemplo, Sakr et al. [6] estudiaron el comportamiento cíclico de pórticos con relleno de albañilería aplicando CFRP. Sus resultados verifican un aumento significativo de la resistencia lateral de estos pórticos. Así también, Marbaniang et al. [7] analizaron el uso de la malla electrosoldada (WWM) para reforzar muros de albañilería y determinó que este refuerzo favorece considerable la resistencia a flexión, la ductilidad y la capacidad de disipación de energía en dichos muros.

Finalmente, existe una técnica en particular de reparación que utiliza mortero reforzado con mallas textiles (TRM) la cual se ha vuelto muy atractiva para la reparación de elementos de albañilería patrimonial. De acuerdo con Ivorra et al. [8], esta técnica limita los efectos negativos del daño sobre la rigidez estructural de un muro de albañilería por lo que mejora la rigidez, ductilidad y resistencia última a cargas cíclicas horizontales. El TRM también es efectivo en disipar energía en situaciones dinámicas cortante y, es por ello, que el método se

ha aplicado no solamente a muros de albañilería, sino que también se puede aplicar a otros elementos estructurales tales como pilares, vigas y losas. Este método también ha demostrado ser ambientalmente sostenible gracias a que los materiales utilizados solo contienen materias primas de origen natural y minerales reciclados con reducidas emisiones de CO<sub>2</sub> [9].

Recientemente, Faella et al [10] realizó varios ensayos sobre muros reforzados por ambos lados con esta técnica y sometidos a compresión diagonal mostrando una capacidad última de corte que supera en 4 a 6 veces la capacidad de muros sin refuerzo. Por otro lado, Babaeidarabad et al [11] realizó ensayos a compresión diagonal en 9 muros de ladrillo de arcilla considerando 3 muros de control y 6 muros con refuerzo de 1 a 4 capas de carbono con espesor variable de 10 [mm] a 40 [mm] reforzada con TRM, demostrando así una buena eficiencia del sistema de rehabilitación con mejoras de 2.43 y 4.73 en la resistencia al corte para TRM de 1 y 4 capas, respectivamente. De forma similar, Gams et al [12] realizó ensayos con ladrillos históricos de albañilería con un espesor de 250 mm reforzado con malla de fibra bidireccional embebida en mortero a base de cal de 25 mm de espesor compuesto por cemento Portland fil, siendo sometido a ensayos de cargas cíclicas por corte. En estos ensayos se verificaron aumentos de resistencia del orden de un 30% veces por sobre la resistencia de elementos sin refuerzo.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la variación de la resistencia y rigidez de un muro plano de albañilería simple reforzado con TRM sometido a un esquema de cargas horizontales cíclicas aplicando en su viga de coronamiento. Los resultados serán comparados con otros 3 muros ensayados bajo las mismas condiciones, pero con diferentes tipos de reforzamiento: bandas superficiales diagonales de CFRP (EB-CFRP), cordones insertos cerca de la superficie de (NSM-CFRP) y reforzamiento mortero y malla electrosoldada (WWM).

## 2. METODOLOGÍA

El espécimen de ensayo consiste en un muro de albañilería simple con dimensiones de 2.4 [m] de largo y 1.8 [m] de alto utilizando ladrillos macizos de arcilla con dimensiones 28 [cm] x 14[cm] x 4.5[cm] (Figura 1.a), por lo que el espesor del muro es de 14 [cm]. Las unidades de albañilería fueron adheridas utilizando un mortero premezclado de la marca Topex. Para hacer más realista el ensayo considerando las construcciones antiguas se le adiciona un 20% más de arena para reducir su resistencia considerando una relación de agua-mortero-arena de 3.75:20:5.

Se utilizó una fundación hormigón armado grado G-25 ya utilizada previamente en otros ensayos con iguales condiciones de diseño. Para fijar el muro, en primer lugar, se realizó un surco de 18[mm] para insertar las primeras filas de ladrillos, además la incrustación de cinco espigas de acero de 15[cm] de largo y diámetro 20 [mm] adheridas con Sika Anchorfix 1 distribuidas equidistantes que sirven para asegurar la adherencia de las primeras dos corridas de ladrillos. Se utilizó además un puente adherente Pegadur-32 de Topex para una mayor sujeción de estas primeras filas de ladrillo a la fundación. Una vez listo el muro se construye en la parte superior una viga de hormigón armado de sección 22 [cm] x 26[cm] (Figura 1.b).



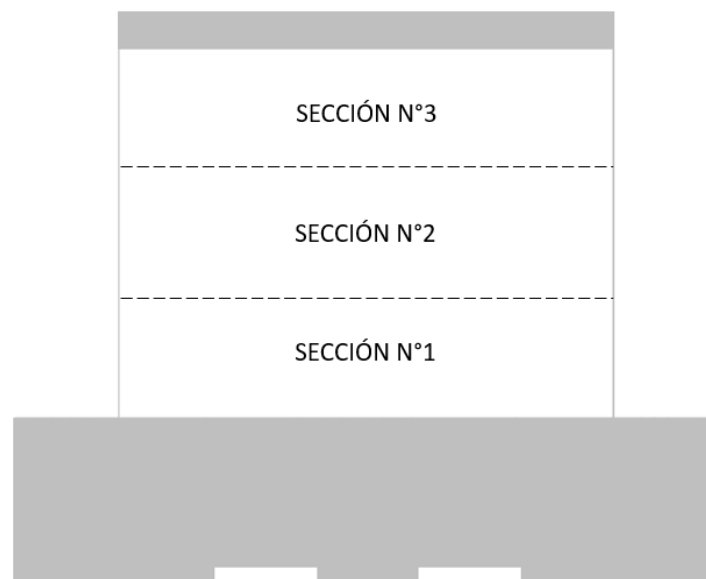
(a)



(b)

**Figura 1:** (a) Muro de albañilería simple, (b) Muro de albañilería con viga superior.  
(Fuente: elaboración propia)

En paralelo a la construcción se tomaron muestras de mortero y construyeron prismas de albañilería para caracterizar los materiales del muro. Estas muestras consistieron en probetas de mortero, prismas de albañilería para ser ensayados a compresión y prismas de albañilería para ser ensayados a adherencia. La caracterización fue realizada en 3 etapas a medida que se levantó el muro (Figura 2) dando como resultados de los ensayos una resistencia media de las probetas a compresión de 4.44 [MPa], los prismas una resistencia a compresión de mortero media de 4.78 [MPa] y ensayo de adherencia 1.25 [MPa], los datos de cada espécimen están indicados en las Tablas 1 y 2.



**Figura 2:** Distribución de sección en muro URM para su caracterización. (Fuente: elaboración propia)

**Tabla 1:** Datos a compresión probetas con 20% adicional de arena.  
 (Fuente: elaboración propia)

	Código	Resistencia [Mpa]
SECCIÓN 1	C_00	3,74
		3,97
	C_01	4,35
		3,94
	C_02	4,16
		4,11
SECCIÓN 2	C_03	4,75
		4,72
	C_04	4,55
		4,45
	C_05	4,74
		4,54
SECCIÓN 3	C_06	4,38
		4,86
	C_07	5,06
		4,55
	C_08	4,87
		4,18

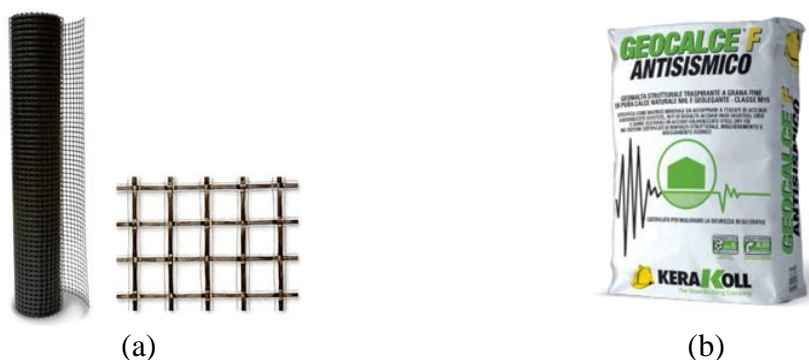
**Tabla 2:** Datos ensayos prismas a compresión y adherencia con 20% de arena adicional.  
 (Fuente: elaboración propia).

		Código	Resistencia [MPa]
Adherencia	Sección 1	Ad_00.	1,33
		Ad_00	1,45
	Sección 2	Ad_01.	-
		Ad_01	1,14
	Sección 3	Ad_02.	1,17
		Ad_02	1,15
Compresión	Sección 1	C_00.	3,93
		C_00	4,70
	Sección 2	C_01.	4,47
		C_01	4,84
	Sección 3	C_02.	-
		C_02	5,96

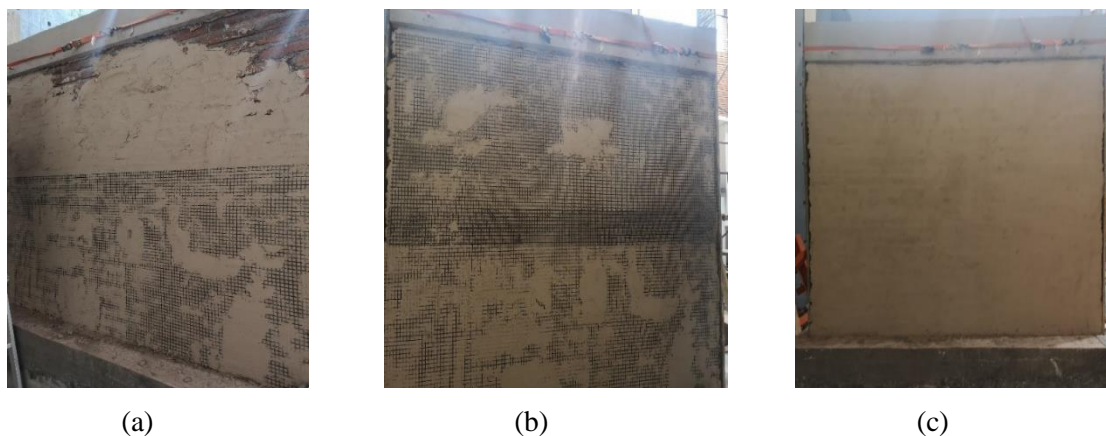
Ya transcurrido los 28 días desde que se construye el muro se comienza a aplicar el reforzamiento TRM en una sola de sus caras. El primer paso consistió en limpiar la superficie del muro del exceso de mortero de pega y aplicar una delgada capa de mortero de reparación

GeoCalce F Antisísmico (Figura 2.b). Sobre esta primera capa de mortero se adhirió la malla GeoSteel Grid 200 (Figura 2.a). Para esto, se cortan 2 secciones de mallas para cubrir completamente el plano del muro considerando que se necesita cubrir  $4.2 \text{ [m}^2\text{]}$ . La primera sección se ubica en la parte inferior del muro (Figura 3.a) mientras que la segunda malla se aplica en la parte superior del muro, dejando un traslape entre mallas de  $15 \text{ cm}$  según lo recomendado por Kerakoll (Figura 3.b). Finalmente, se aplica la segunda capa de mortero llegando a un espesor máximo de  $1.5 \text{ [cm]}$  embebiendo completamente la malla GeoSteel Grid 200 (Figura 3.c).

La malla textil de refuerzo está compuesta por hilos de acero con una resistencia a tracción de  $7600 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$  con un módulo de elasticidad de  $20000 \text{ [KN/cm}^2\text{]}$  y fibras de basalto con una resistencia a tracción de  $30591 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$  y módulo elástico de  $8700 \text{ [KN/cm}^2\text{]}$ . Por otro lado, según el fabricante el mortero de reparación posee una resistencia a compresión mayor a  $15 \text{ [MPa]}$  (según norma EN12190 [13]), resistencia a Tracción por flexión mayor  $5 \text{ [MPa]}$  (según norma EN196/1 [14]), una adherencia mayor a  $0.8 \text{ [MPa]}$  (según norma EN1542 [15]), adherencia sobre ladrillo mayor a  $1 \text{ [MPa]}$  (según norma EN1015-1 [16]) y Módulo elástico a compresión de  $9 \text{ [MPa]}$  (según norma EN13412 [17]), todo medido a los  $28 \text{ días}$  [18]. Ensayos de laboratorio realizados para esta investigación a muestras de mortero de reparación revelaron una resistencia media de las probetas a compresión de  $7.51 \text{ [MPa]}$  (Tabla 3).



**Figura 2:** (a) Malla GeoSteel Grid 200, (b) Mortero GeoCalce F Antisísmico (Fuente: Manual Kerakoll).



**Figura 3:** (a) Primera sección malla, (b) Segunda sección malla con  $15 \text{ [cm]}$  de traslape, (c) capa final de mortero embebiendo la malla. (Fuente elaboración propia).

**Tabla 3:** Datos ensayo a compresión del estuco. (Fuente: elaboración propia).

Estuco	Resistencia Máx. [MPa]
Sección N°1	7,75
	7,67
Sección N°2	6,37
	7,93
Sección N°3	7,84
	7,49
Promedio	7,51

### Descripción procedimiento de instrumentación y ensayo.

Para aplicar la secuencia de carga sobre el espécimen de prueba, se instaló un aparejo de acero sobre la viga superior, cuya función es aplicar las cargas de forma distribuida sobre el muro. La carga horizontal se aplicó por medio de un actuador hidráulico Enerpac modelo BRD-2510 figura (4.a) donde es accionado por una bomba hidráulica modelo ZU4 (figura 4.b)



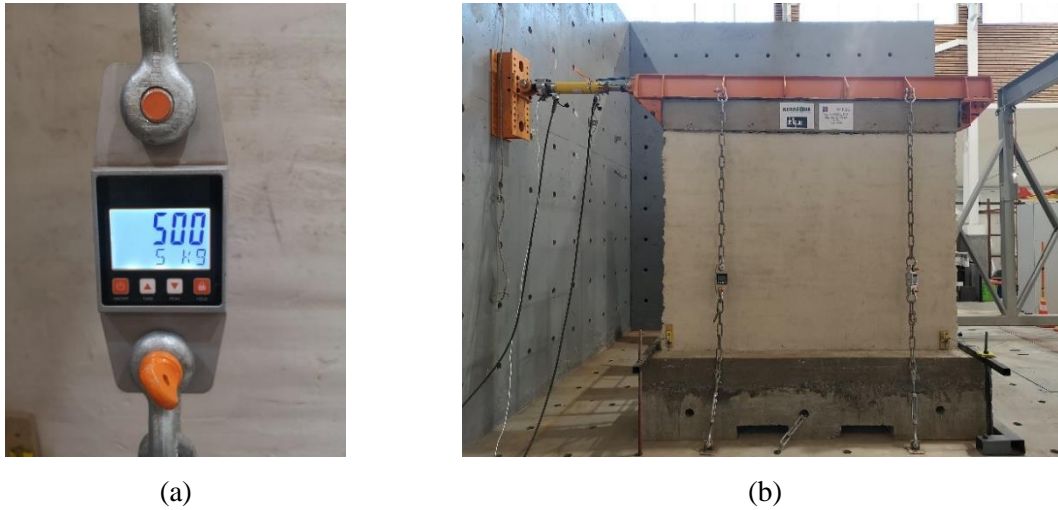
(a)



(b)

**Figura 4:** (a) actuador hidráulico Enerpac modelo BRD-2510, (b) bomba hidráulica Enerpac modelo ZU4 (Fuente: elaboración propia).

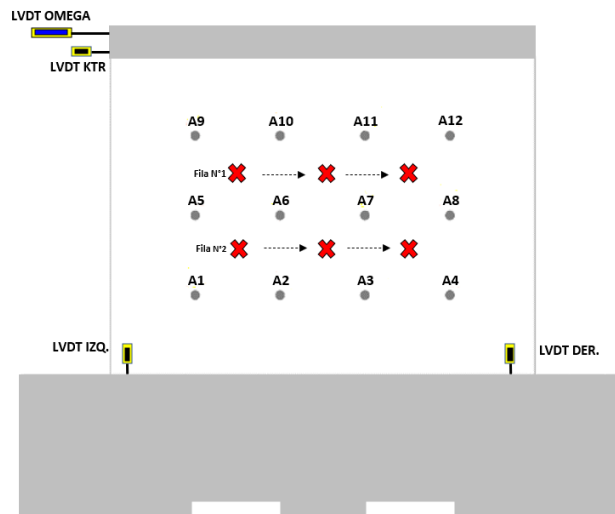
La fundación es anclada mediante tensores a la losa de reacción. El aparejo de carga también se conecta a la losa de reacción mediante cadenas y tensores, estas cadenas están conectadas por medio de grilletes a sendos dinamómetros que permiten medir la carga vertical aplicada sobre el muro, que al inicio de cada ensayo es de 500[kg] por cadena (figura 5.a) generando carga axial total sobre el muro de 2 [Ton] (Figura 5.b)



**Figura 5:** (a) Dinamómetro con 500[kg] aplicados (b) preparación ensayo en muro de reacción. (Fuente: elaboración propia).

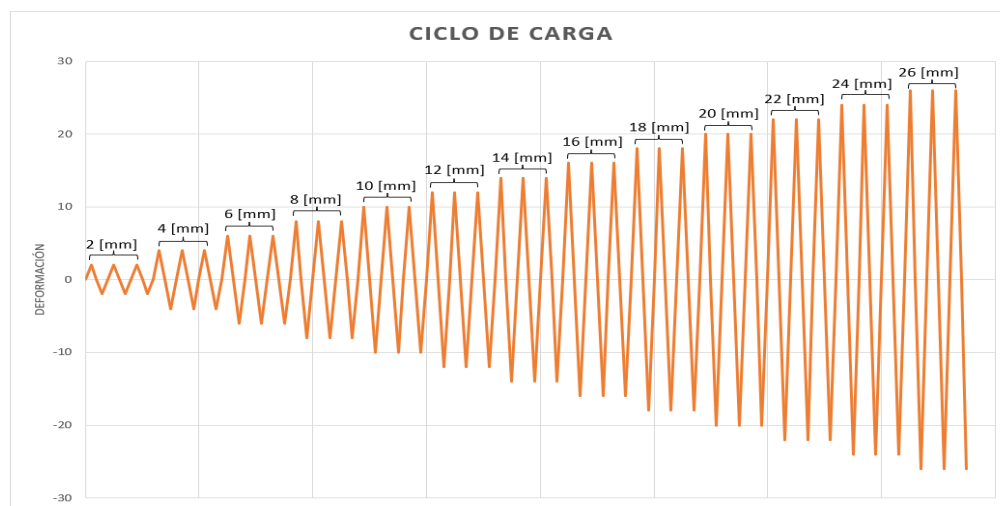
Para el registro de desplazamiento y deformaciones se instrumenta el muro con cuatro transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT), 2 de ellos están ubicados en la parte superior izquierda en el actuador (OMEGA y KTR) para el registro del desplazamiento horizontal en el actuador y 2 en la parte inferior (IZQ-DER) hacia los extremos para detectar desplazamiento vertical en la base.

Adicionalmente, se instrumentó una cara de las caras del muro con 12 acelerómetros uniaxiales distribuidos de forma equidistante a 48 [cm] a fin de poder ejecutar ensayos de identificación modal cuyo análisis escapa a los alcances de este estudio. Este ensayo de identificación modal consistió en registrar la respuesta vibratoria del muro debido a excitaciones generadas por impactos de martillo sobre una serie de puntos predeterminados, tal como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6:** instrumentación de LVDT, acelerómetros y secuencia de golpes. (Fuente: elaboración propia).

La secuencia de carga aplicada durante este experimento fue controlada por desplazamientos y consta de series de 3 ciclos de igual amplitud, iniciando con 2 mm en cada dirección, que progresivamente fueron aumentando en amplitud (2 mm en cada serie) hasta llegar a 26[mm] de desplazamiento (Figura 7). Entre cada serie de 3 ciclos se detiene el ensayo para inspeccionar, tensar las cadenas al valor original de 500[Kg] en cada una y realizar un ensayo modal.



**Figura 7:** Ensayo ciclo de cargas a muro TRM. (Fuente: elaboración propia).

### 3. RESULTADOS

Los resultados generales del ensayo completo se presentan en la Tabla 4 y las Figuras 8 a la 13. A fin de dar una visión más detallada del progreso del ensayo, este será descrito por etapas.

Para la Fase n°1 la gráfica de histéresis (Figura 8.a) en extensión el valor máximo alcanzado es de 4.8[Ton] con un desplazamiento de 3.2 [mm]. En contracción se obtiene un valor máximo de 4.8 [Ton] con un desplazamiento de -3.1 [mm]. Para la toma de datos se considera la máxima de los 3 ciclos y la variabilidad de rango de datos es producto del uso manual del actuador. Durante esta primera fase no se visualizan grietas por lo que se supone que el muro aún responde de forma elástica volviendo a su posición inicial.

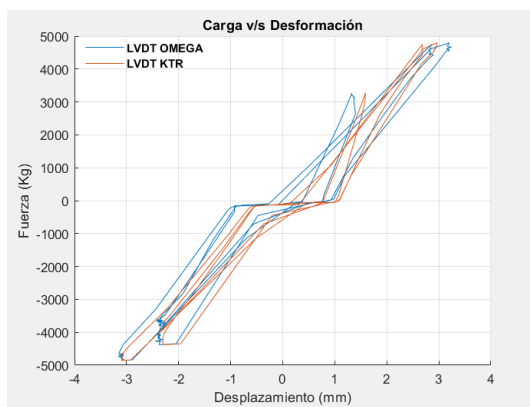
En la Fase n°2 (Figura 8.b) en extensión el valor máximo alcanzado es de 5.9[Ton] con un desplazamiento de 5 [mm]. Para contracción se obtiene un valor máximo de 6.3 [Ton] con un desplazamiento de -4.6[mm]. En el tercer ciclo de esta fase ya comienza a aparecer la primera grieta pequeña entre la junta muro/fundación lo que es considerado como una falla por adherencia en la base.

Durante la Fase n°3 (Figura 8.c) en extensión el valor máximo alcanzado es de 6.9[Ton] con un desplazamiento de 7 [mm]. Para contracción se obtiene un valor máximo de 7.5 [Ton] con un desplazamiento de -6.2[mm]. En los ciclos de esta fase la falla por adherencia en la base antes detectada comienza a crecer a lo largo de la junta muro/fundación.

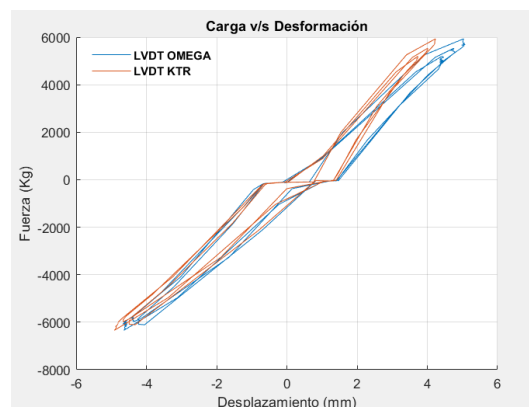
En la Fase n°4 (Figura 8.d) en extensión el valor máximo alcanzado es de 8.2[Ton] con un desplazamiento de 9.04 [mm]. Para contracción se obtiene un valor máximo de 9 [Ton] con un desplazamiento de -7.6[mm]. En los ciclos de esta fase las grietas comienzan a crecer y la falla por adherencia se hace evidente (Figura 9.a y 9.b).

**Tabla 4:** Registro de datos extraídos en gráficos histéresis Carga v/s Deformación.  
(Fuente: elaboración propia).

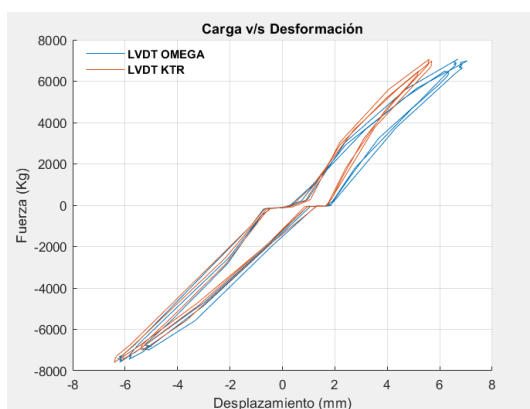
Fase	EXTENSION		CONTRACCIÓN	
	Carga [Kg]	Max. Def [mm]	Carga [Kg]	Max. Def [mm]
Nº1	4797	3,202	4857	-3,164
Nº2	5936	5,039	6341	-4,642
Nº3	6984	7,049	7597	-6,211
Nº4	8292	9,04	9002	-7.683
Nº5	9628	10,26	10610	-11,41
Nº6	10300	12,71	11650	-11.89
Nº7	10980	13,93	12610	-14.2
Nº8	10180	16,01	-	-
Nº9	14610	17,59	-	-
Nº10	15010	19,18	-	-
Nº11	16280	21,46	-	-
Nº12	15570	23,86	-	-
Nº13	17740	26,51	-	-



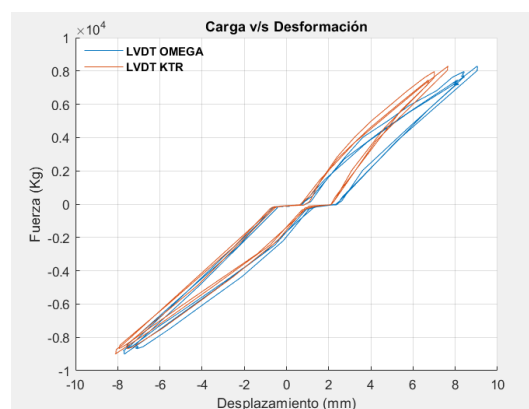
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 8:** Registro carga v/s deformación ensayos carga cíclica de (a) Fase 1, (b) Fase 2, (c) Fase 3 y (d) Fase 4. (Fuente: elaboración propia).



**Figura 9:** (a) aparición de grietas en los ladrillos parte inferior izquierda, (b) falla por adherencia junta muro/fundación parte inferior derecha. (Fuente: elaboración propia).

En la Fase n°5 (Figura 10a) el valor máximo alcanzado en extensión es de 9.6[Ton] con un desplazamiento de 10 [mm], mientras que para contracción se obtiene un valor máximo de 10 [Ton] con un desplazamiento de -11.4[mm]. En los ciclos de esta fase la falla principal crece a lo largo de la junta muro/fundación de forma gradual en la parte inferior para tracción y contracción.

En la Fase n°6 (Figura 10b) en extensión el valor máximo alcanzado es de 10.3[Ton] con un desplazamiento de 12.7 [mm], y para contracción se obtiene un valor máximo de 11.9 [Ton] con un desplazamiento de -14.5[mm]. No se observa variación en el tipo de falla.

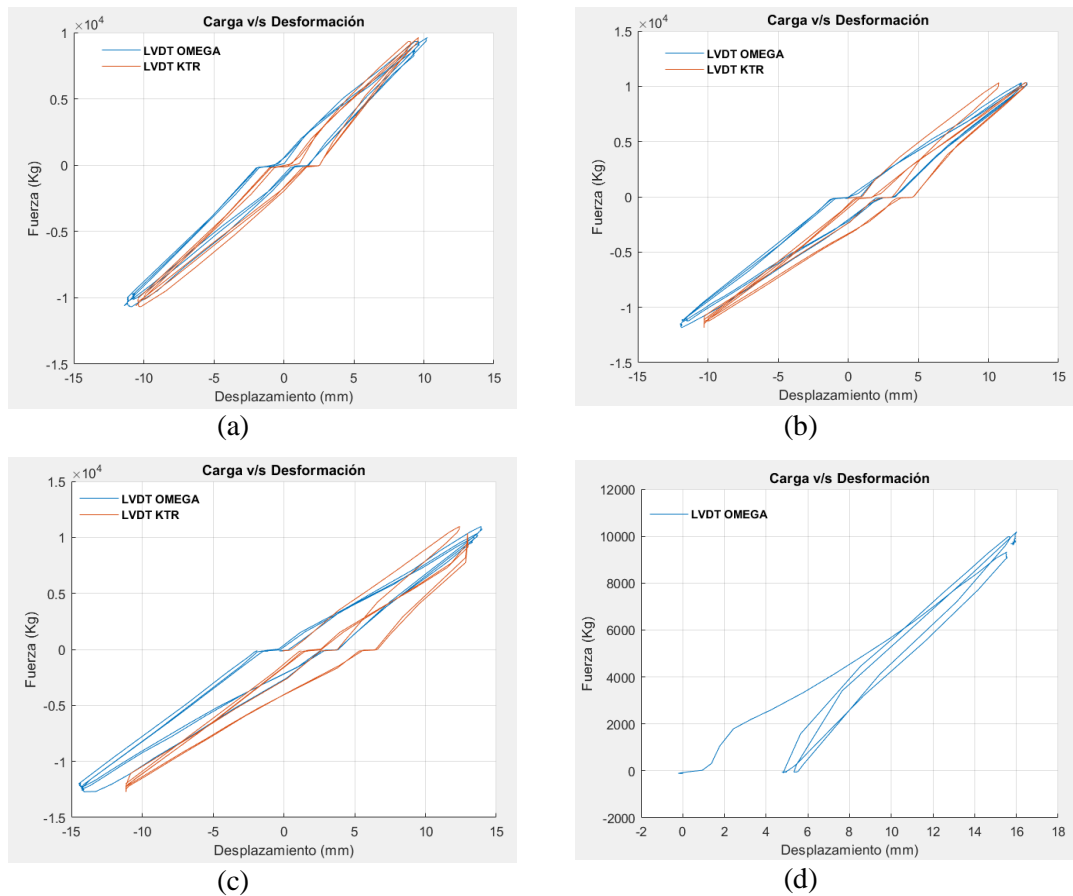
Algo similar ocurre en la Fase n°7 (Figura 10c), que en extensión alcanza una carga de 10.9[Ton] con un desplazamiento de 13.9 [mm], y para contracción se obtiene un valor máximo de 12.6 [Ton] con un desplazamiento de -14.2[mm], sin que se observe una variación en la falla.

Al llegar a la Fase n°8 (Figura 10d), fue retirado uno de los LVDT(KTR) dado que es de corto recorrido, dejándose solamente el LVDT omega el cual tiene un recorrido máx. de 150[mm]. En esta fase el valor máximo alcanzado en extensión es de 10.1[Ton] con un desplazamiento de 16.01 [mm]. Finalizando el último ciclo de carga a contracción la estructura sufre un desplazamiento total mostrado en las Figuras 11.a, 11.b.

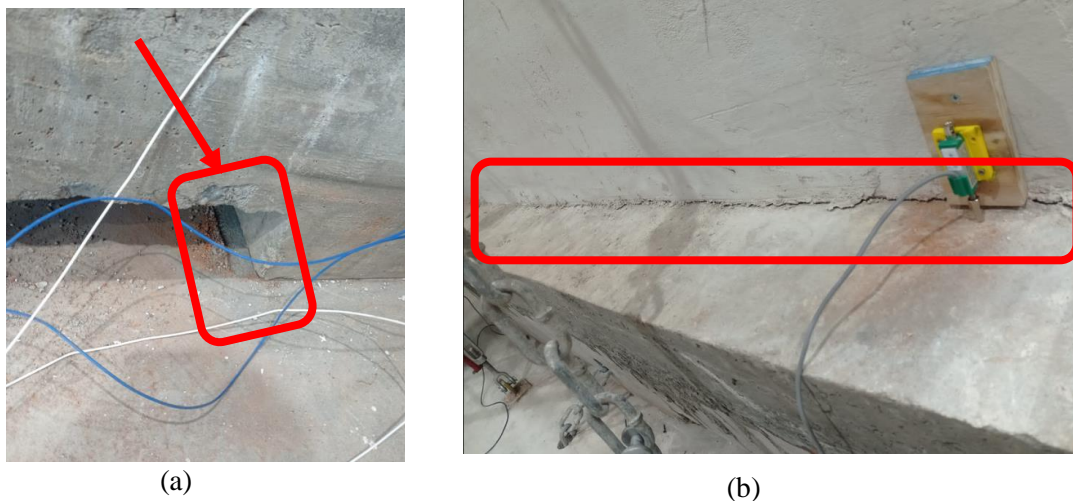
En la Fase n°9 (Figura 12a) en extensión el valor máximo alcanzado es de 14.6[Ton] con un desplazamiento de 17.5 [mm]. A partir de estos ciclos el muro tiende a volcar por aplastamiento en la parte inferior derecha del muro. En los ciclos de esta fase la falla principal crece a lo largo de la junta muro/fundación de forma gradual.

En Fase n°10 (Figura 12b) se excede la capacidad de carga de dos de los dinamómetros por lo que se retiran y se dejan las cadenas unidas directamente a los grilletes. En extensión el valor máximo alcanzado es de 15[Ton] con un desplazamiento de 19.1 [mm], el muro tiende a volcar generando falla por aplastamiento en la parte inferior derecha del muro (Figura 13), y la grieta de adherencia se extiende a largo de toda la junta muro/fundación visualizando casi el despegue total de la unión de la parte superior de la fundación.

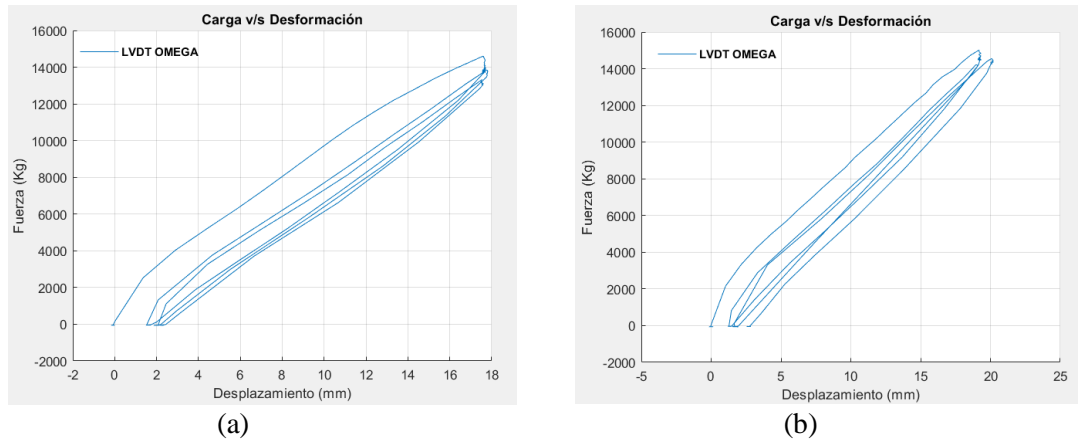
A partir de la Fase 11 hasta la Fase 13 (Figura 14) el procedimiento es igual al caso anterior, observándose un mayor daño por aplastamiento en la cabeza de compresión, sin que se observe ninguna grieta en la superficie del muro, por lo tanto, el ensayo se detuvo.



**Figura 10:** Registro carga v/s deformación ensayos carga cíclica de (a) Fase 5, (b) Fase 6, (c) Fase 7 y (d) Fase 8. (Fuente: elaboración propia).



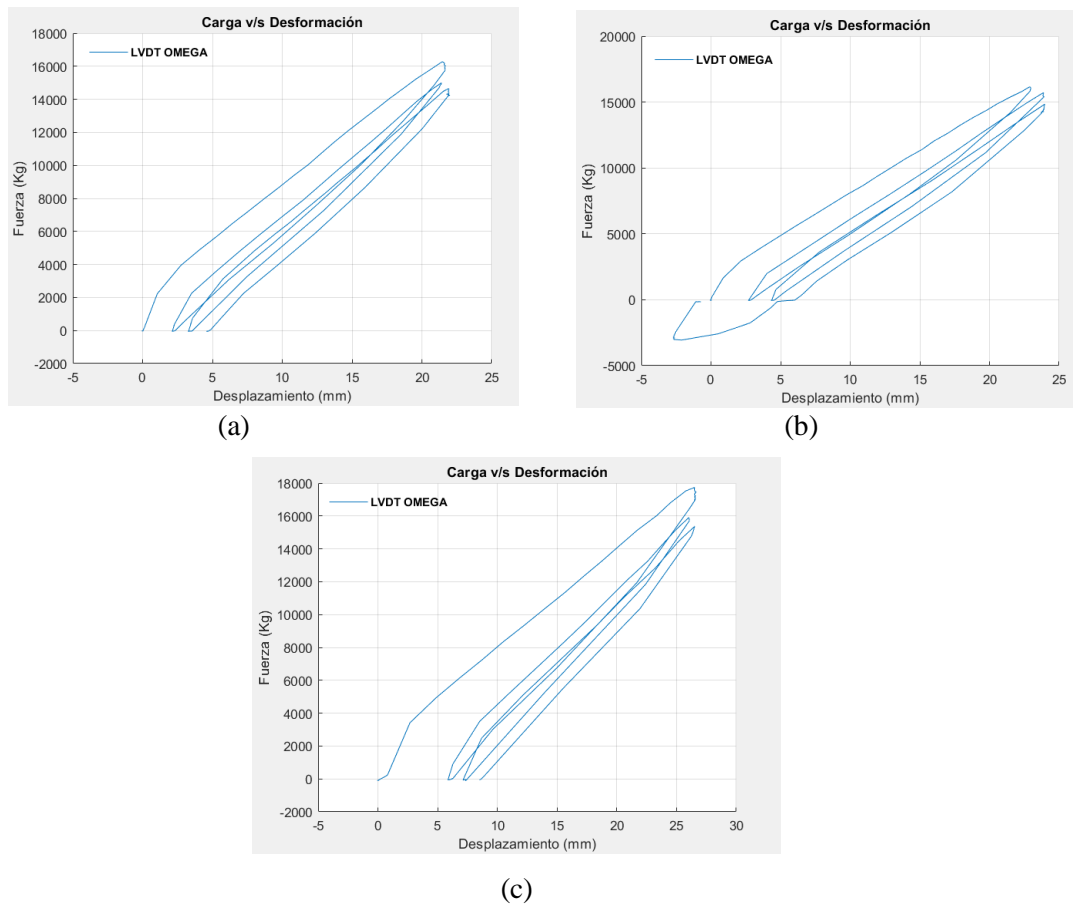
**Figura 11:** (a) deslizamiento de la fundación en ciclo de 16 [mm], (b) falla por adherencia a lo largo de la junta muro/fundación. (Fuente: elaboración propia).



**Figura 12:** Registro carga v/s deformación ensayos carga cíclica de (a) Fase 9 y (b) Fase 10. (Fuente: elaboración propia).

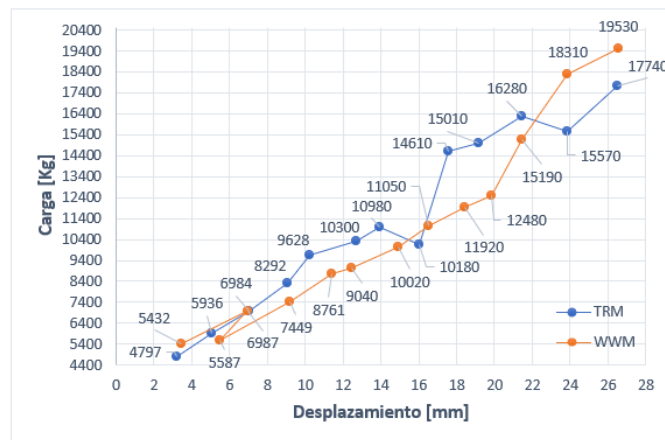


**Figura 13:** Falla por aplastamiento. (Fuente: elaboración propia).



**Figura 14:** Registro carga v/s deformación ensayos carga cíclica de (a) Fase 11, (b) Fase 12 y (c) Fase 13. (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 15 se presenta un gráfico que caracteriza el comportamiento carga v/s desplazamiento del muro a lo largo de toda la historia del ensayo. Dado la falla por adherencia no se logró obtener una falla dentro del plano del muro ni se obtuvieron grietas.

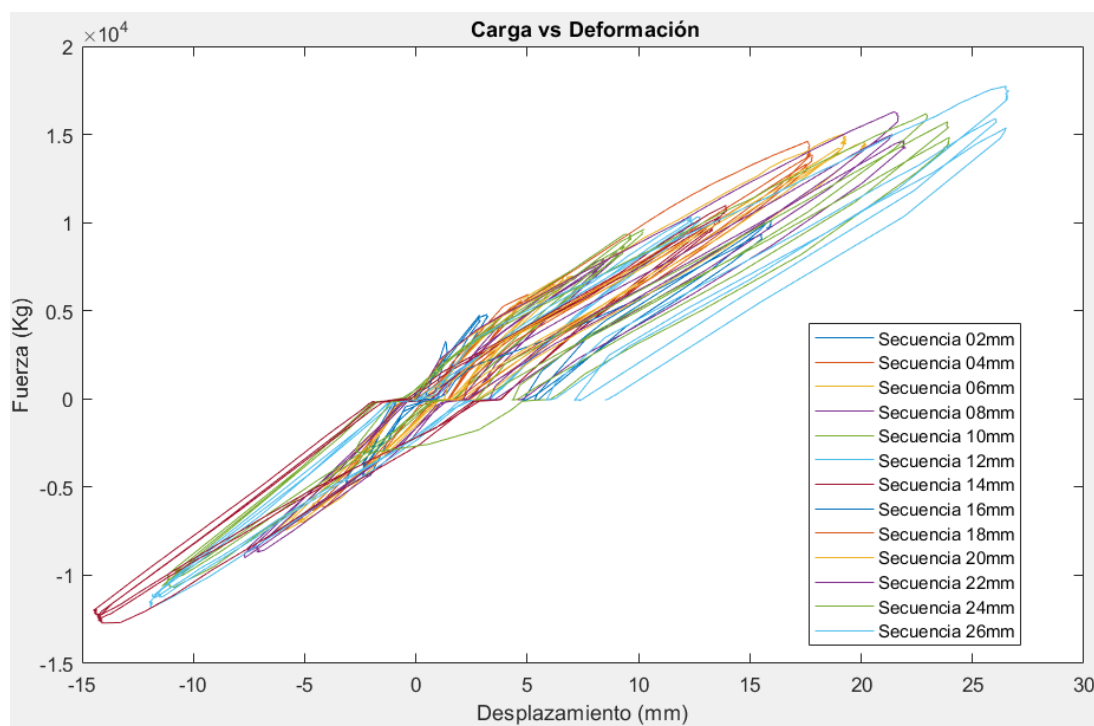


**Figura 15:** Carga v/s deformación. (Fuente: elaboración propia).

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Analizando la secuencia de cargas se puede inferir a partir de la Fase 2 se comienza a generar pequeñas fisuras en los ladrillos, así como también en la unión muro/fundación. Este tipo de grietas fueron aumentando solamente a nivel de la base del muro, en especial primera fila de ladrillos. De hecho, a medida que aumentaban las cargas se propagan a tal punto de generar un desprendimiento total de la base a causa de la falla por adherencia observado hasta la Fase 13. Producto de esta falla el espécimen a contar de los 20 [mm] hasta 26[mm] de desplazamiento correspondiente a Fase 10 y 13, tiende a rotar, similar a lo observado en los experimentos Thomoglou et al. 2019 y Mohamed et al. (2007).

La Figura 16 se observa el historial registrado por el LVDT omega realizado por protocolos de ensayos cíclicos de amplitud creciente, del comportamiento del espécimen en estudio sometido a cargas v/s deformación se observa que las curvas registradas de los 5 [mm] en adelante el muro presenta pequeños desplazamientos dado que las curvas de histéresis no vuelven a su origen, además producto del deslizamiento del muro de la Fase 8 (Figura 10d y 11a) el muro requirió de menos carga para alcanzar dicho desplazamiento en la secuencia de 16 [mm].



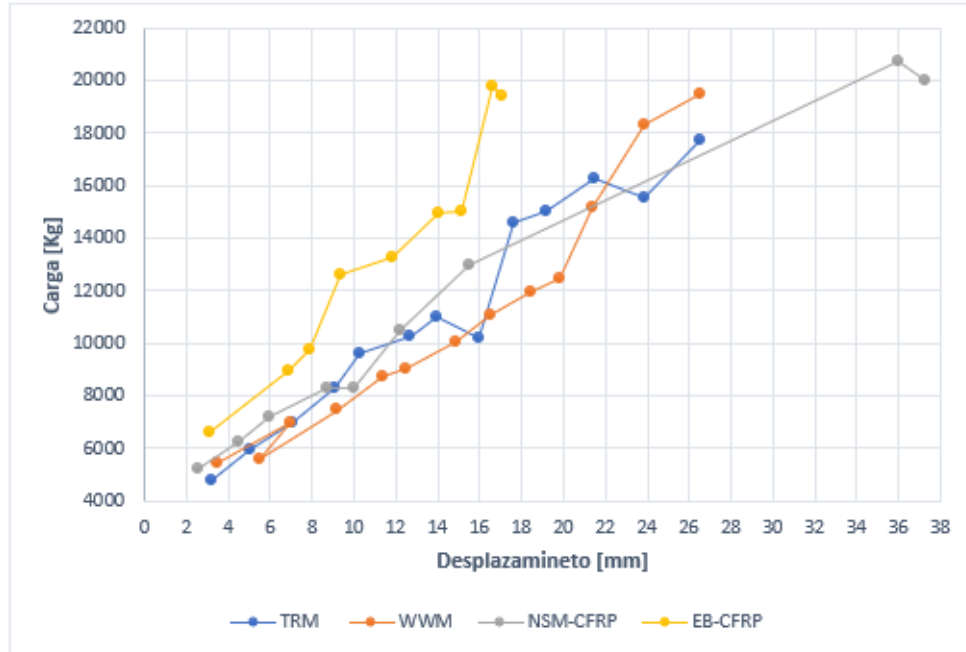
**Figura 16:** Histéresis registrado por LVDT omega. (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 17 se comparan los resultados de este ensayo de un muro reforzado con TRM con otro ensayo gemelo en que el muro se reforzó con malla electrosoldada (WWM). En esta gráfica se puede observar que el mortero con TRM tiene una mejor capacidad resistente a cargas en mismas condiciones de desplazamiento excepto en las últimas dos fases donde se observa una disminución en la resistencia a cargas en extensión. Ambos ensayos llegan a deformaciones del orden de 26 [mm]. Por otro lado, también, se realizaron otros estudios aplicando refuerzos con NSM-CFRP y EB-CFRP bajo mismas condiciones de carga en

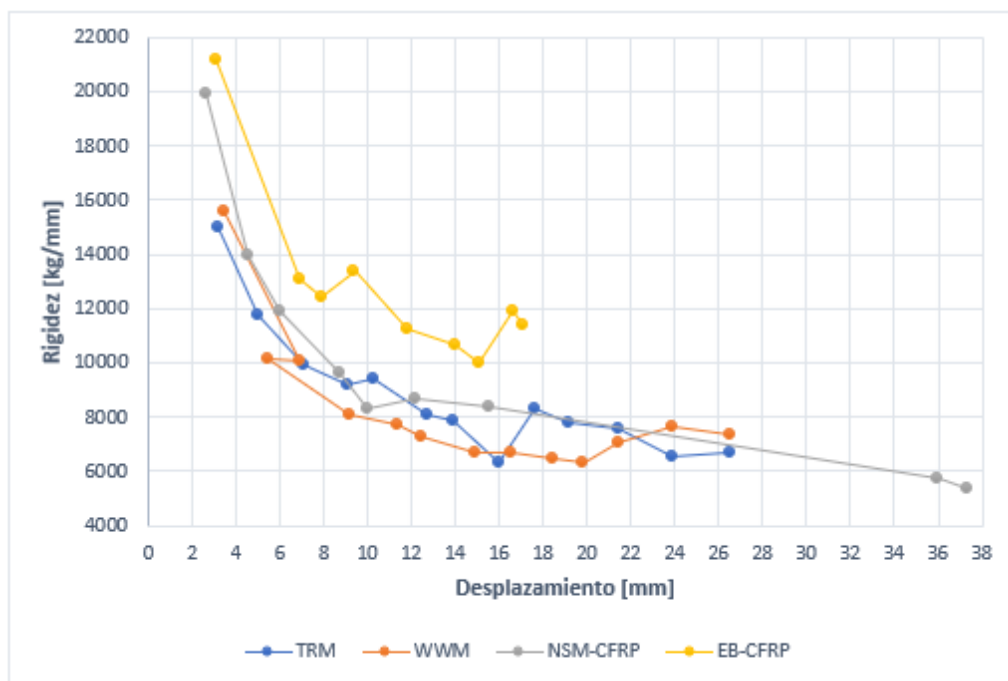
extensión llegando solamente a 16 [mm] de deformación, ambos métodos presentan una mayor resistencia a cargas en mismas condiciones en desplazamiento siendo el método EB-CFRP demostrando un mejor desempeño a cargas por sobre los otros métodos mencionados anteriormente.

En la Figura 18 se presenta el decaimiento de rigidez antes los esfuerzos cíclicos observándose distintos comportamientos entre los métodos. De acuerdo con estudios realizados bajo mismas condiciones de construcción, los métodos NSM-CFRP y EB-CFRP demuestran un mayor aporte en rigidez hasta alcanzar una falla frágil diagonal en el plano debido al colapso de los refuerzos en el muro, mientras que los refuerzos TRM y WWM no presentan daños en el plano del muro siendo las únicas fallas por adherencia y aplastamiento demostrando un mejor desempeño ante disipación a esfuerzos de corte gracias a la capa extra de estuco añadida a los muros.

Respecto a la trabajabilidad de los métodos en particular NSM-CFRP y EB-CFRP resultan ser de fácil instalación al momento de realizar las mezclas correspondientes de aplicación con tiras y paños de fibra, si es necesario que sea ejecutado por personal calificado ya que la mala instalación de las fibras o mezclas resulten no ser aporte al reforzamiento, producto de esto puede generar una disminución en la rigidez. Por el contrario, los métodos TRM y WWM la aplicación de la mezcla de estuco resulta ser muy amigable al momento de trabajarlo como así también la instalación de la malla gracias a su peso extremadamente ligero por otro lado la malla utilizada para el WWM resulta ser más dificultoso el instalar debido a que previamente durante la construcción del muro hay que añadir ganchos de acero de tal forma que permitan el enganchar la malla y además la mezcla de estuco realizada para este muro resulta más difícil de aplicar en comparación al del TRM.



**Figura 17:** Comparación carga a extensión TRM v/s WWM captado por LVDT omega.  
(Fuente: elaboración propia).



**Figura 18:** Rigidez v/s desplazamiento de refuerzo TRM y WWM.  
 (Fuente: elaboración propia).

## 5. CONCLUSIONES

La técnica de reforzamiento implementada es de muy fácil aplicación, muy similar al procedimiento de aplicar estuco o empastar un muro y se adapta a cualquier superficie irregular. A partir de este ensayo, queda en evidencia que al realizar cargas cíclicas su rigidez va disminuyendo gradualmente tanto en para el refuerzo con TRM como WWM.

Con la aplicación del refuerzo con TRM se logró un aumento en la resistencia y rigidez evitando por completo la generación de grietas en la superficie del muro, demostrando una excelente compatibilidad en términos de deformaciones entre el refuerzo y el muro original, algo distinto a lo observado en los muros reforzados con FRP y TRM. Sin embargo, no se pudo evitar el daño en la base del muro, por lo que resulta de suma importancia implementar técnicas que permitan mejorar el anclaje del refuerzo con la fundación de los muros.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por ANID/CONICYT en el marco del proyecto FONDECYT Iniciación 11200117. Además, se contó con el apoyo de la empresa Ubique Ltda quienes donaron el material para el reforzamiento de los muros ensayados.

## 7. REFERENCIAS

- [1] **Instituto Nacional de Normalización. (2003).** “Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo”. Norma Chilena Oficial. Nch 2123 of 2003.
- [2] **Instituto Nacional de Normalización. (2009).** “Albañilería Armada - Requisitos de diseño y cálculo”. Norma Chilena Oficial. Nch 1928 of 2009
- [3] **Palazzi, N. C., Favier, P., Rovero, L., Sandoval, C., & de la Llera, J. C. (2020).** Seismic damage and fragility assessment of ancient masonry churches located in central Chile. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(7), 3433-3457.
- [4] **Thomoglou, A., Rousakis, T., & Karabinis, A. (2018, June).** Numerical modeling of shear behavior of URM strengthened with FRCM or FRP subjected to seismic loading. In *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering*, Thessaloniki, Greece (pp. 18-21).
- [5] **Mahmood, H., and Ingham, J. M. (2011).** “Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallets.” *Journal of Composites for Construction*,
- [6] **Sakr, M. A., El-Khoriby, S. R., Seleemah, A. A., Aboelnour, M. M., & Osama, B. (2021, October).** Experimental and numerical investigation on cyclic behavior of masonry infilled RC frames retrofitted with partially bonded CFRP strips. In *Structures* (Vol. 33, pp. 2238-2252). Elsevier.
- [7] **Marbaniang, DF, Warjri, T. y Marthong, C. (2022).** Flexión fuera del plano del empotramiento de muros de mampostería con malla de alambre soldado (WWM) en diferentes orientaciones. *Soluciones innovadoras de infraestructura*, 7 (1), 1-15.
- [8] **Ivorra, S., Camassa, D., Bru, D., Gisbert Sánchez, J. I., Castellano, A., Fraddosio, A., & Piccioni, M. D. (2020).** Assessment of the TRM reinforcement of windowed masonry walls through OMA identification.
- [9] **Geocalce® F Antisismico.** (s. f.). Kerakoll Products. <https://products.kerakoll.com/es-ES/p/geocalcesup-f-antisismico>.
- [10] **Faella, C., Martinelli, E., Nigro, E., & Paciello, S. (2010).** Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign. *Construction and Building Materials*, 24(1), 84-93.
- [11] **Babaeidarabad, S., De Caso, F., and Nanni, A. (2013).** “URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression”. *Journal of Composites for Construction*. 18. 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000441.
- [12] **Gams, M., Kwiecien, A., Zajac, B. and Tomacevic, M. (2014),** “Seismic strengthening of brick masonry walls with flexible polymer coating”, *The 9th International Masonry Conference in Guimarães*, IBSN 978-972-8692-85-8, ID 1502.
- [13] EN 12190 – Determinación de la resistencia a compresión de los morteros para reparación.
- [14] EN 196-1 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de las resistencias mecánicas.
- [15] EN 1542:1999 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures



**UCSC**

Simposio de Habilitación Profesional  
Departamento de Ingeniería Civil  
Enero 2023

- Test methods - Measurement of bond strength by pull-off, 2022).

[16] EN 1015-1:1999 Methods of test for mortar for masonry Determination of particle size distribution (by sieve analysis).

[17] EN 13412:2008 Products and systems for the protection and repair of concrete structures  
- Test methods - Determination of modulus of elasticity in compression.