

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA
TUBULAR CONFINADA REFORZADOS CON MALLA
ELECTROSOLDADA ANTE CARGAS SÍSMICAS Y
GRAVITACIONALES**

Tesis para optar el Grado de **Magíster en Ingeniería Civil**, que presenta:

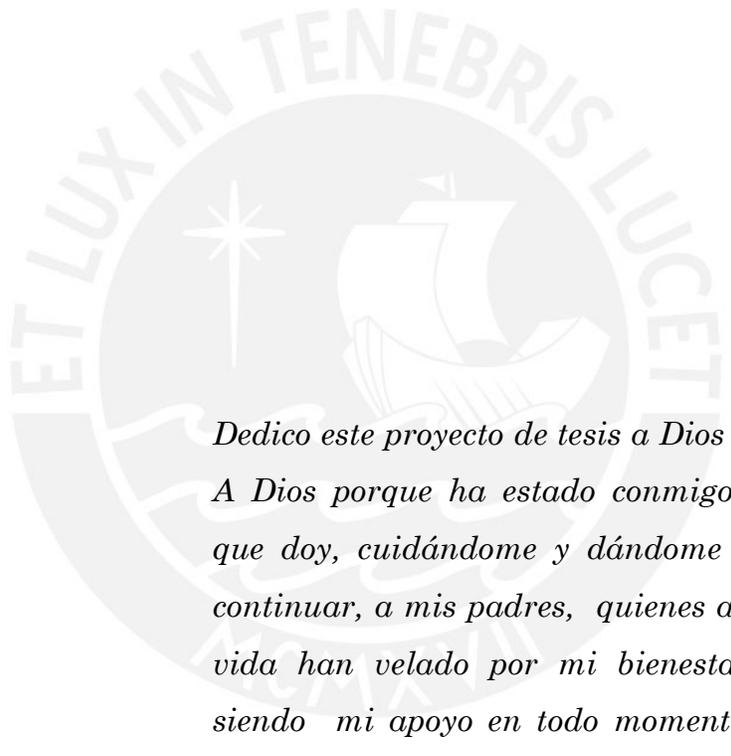
Plinio Mamani Quina

Asesores: **M. Ing. Ángel San Bartolomé Ramos**

M. Ing. Daniel Quiun Wong

Lima, Agosto del 2015

DEDICATORIA



Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mi familia. A Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro **Señor Dios**, quien permitió el desarrollo de este trabajo y me fortaleció con sabiduría.

A la memoria de mi asesor **Ing. Ángel San Bartolomé Ramos** que con su incansable amor por la ingeniería y la investigación hicieron posible este trabajo, con paciencia, dedicación y sabiduría me oriento incluso en momentos difíciles de su enfermedad, gracias infinitas mí querido asesor, gran amigo y maestro.

A mi asesor **Ing. Daniel Quiun Wong** por sus consejos, recomendaciones y todo su apoyo incondicional durante todo este tiempo en la PUCP.

A la **Ing. Gladys Villa García** y a todo el personal del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP que hicieron posible la realización de los ensayos.

A mis amigos, amigas y compañeros de la maestría que estuvieron presentes en los ensayos brindándome su apoyo incondicional.

Plinio Mamani Quina

RESUMEN

La albañilería confinada es un sistema de construcción que en el Perú conforma gran parte de las construcciones existentes para viviendas y especialmente en zonas de recursos limitados, zonas donde se acostumbró a edificar muros estructurales (muros portantes) con unidades de ladrillo tubular (ladrillo pandereta). El uso del ladrillo pandereta está prohibido para muros estructurales según la norma técnica de albañilería E0.70. Esto se está dando en la costa del Perú y en especial en la ciudad de Lima una zona altamente sísmica, donde existen edificaciones de hasta cinco niveles construidas con unidades tubulares.

Por lo que la presente tesis fue desarrollada con la finalidad de evaluar una técnica de reforzamiento mediante la utilización de una malla electrosoldada. Para esto se construyeron pilas, muretes y dos muros a escala natural construidas con ladrillos pandereta aplicando la técnica de reforzamiento mencionada. El efecto sísmico fue simulado mediante cargas laterales cíclicas que se aplicaron hacia los muros a escala natural con un actuador dinámico estructural en varias fases con desplazamiento lateral controlado. Al mismo tiempo se aplicaron cargas gravitacionales que representarían de una manera aproximada las cargas de servicio que tenemos en una edificación real.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras de la PUCP, en los cuales se determinó el comportamiento mecánico y propiedades mecánicas de los muros reforzados con malla electrosoldada. Esta información de alguna manera es la base para la implementación de las normas existentes, ya que no se contemplan actualmente alternativas para dar una solución al problema ya descrito inicialmente.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Metodología	4
CAPÍTULO 2: PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	6
2.1. Unidad de albañilería tubular	6
2.1.1. Características	6
2.1.2. Ensayos clasificatorios	7
2.1.3. Ensayos no clasificatorios	12
2.1.4. Evaluación de resultados	16
2.2. Cemento	16
2.3. Agregados	16
2.4. Agua	17
2.6. Concreto	17
2.7. Acero de refuerzo	19
2.8. Malla electrosoldada	19
CAPÍTULO 3: PRISMAS DE ALBAÑILERÍA TUBULAR	21
3.1. Pilas de albañilería	21
3.1.1. Características	21
3.1.2. Procedimiento de construcción	22
3.1.3. Instrumentación y montaje	23
3.1.4. Cálculo de la resistencia a compresión axial	24
3.1.5. Cálculo del módulo de elasticidad	25
3.2. Muretes de albañilería	28
3.2.1. Características	28
3.2.2. Procedimiento de construcción	29
3.2.3. Instrumentación y montaje	30
3.2.4. Cálculo de la resistencia al corte en ensayo de compresión diagonal	31
3.2.5. Cálculo del módulo de corte	32

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TEÓRICO Y DISEÑO DE LOS MUROS A ESCALA NATURAL	35
4.1. Diseño de los muros	35
4.1.1. Diseño de los elementos de confinamiento	35
4.1.2. Diseño del reforzamiento con malla electrosoldada	41
4.2. Sección transformada	43
4.3. Cálculo de la rigidez lateral	44
4.4. Fisuración en tracción por flexión	45
4.5. Resistencia asociada a la falla por flexión	46
4.6. Tipo de Falla esperado en MR-01 y MR-02	46
CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE ALBAÑILERÍA REFORZADOS	47
5.1. Características de los muros MR-01 y MR-02	47
5.2. Construcción de la viga de cimentación	48
5.3. Construcción de la Albañilería	49
5.4. Columnas de confinamiento	50
5.5. Vigas Soleras de confinamiento	51
5.6. Colocación de la malla electrosoldada	51
CAPÍTULO 6: ENSAYO DE LOS MUROS DE ALBAÑILERÍA REFORZADOS	54
6.1. Montaje e instrumentación	54
6.2. Fases del ensayo	56
6.3. Comportamiento de los muros	57
6.3.1. Muro MR-01	57
6.3.2. Muro MR-02	62
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS, PROCESAMIENTO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	66
7.1. Diagramas Histeréticos Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral	66
7.2. Envolvente Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral	68

7.3. Desplazamiento lateral permisible	70
7.4. Rigidez lateral inicial	70
7.5. Cálculo experimental del módulo de elasticidad de los muros (E)	73
7.6. Cálculo experimental del módulo de corte de los muros (G)	74
7.7. Resistencia a la tracción por flexión	77
7.8. Resistencia al agrietamiento diagonal	77
7.9. Resistencia máxima	78
7.10. Comportamiento del refuerzo vertical en columnas	78
7.11. Comportamiento de la malla electrosoldada de refuerzo	79
7.12. Grosor máximo de grietas	80
7.13. Comparación de los resultados obtenidos con ensayos anteriores	80
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	82
8.1. Conclusiones	82
8.2. Líneas Futuras de Investigación	84
BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 1: Material predominante en muros de viviendas censadas. (INEI, 2008).....	1
Fig. N° 2: Construcciones de 5 pisos con ladrillo pandereta. (Salinas y Lázares, 2007).....	2
Fig. N° 3: Ladrillo pandereta en Pisco. (San Bartolomé, 2007).....	2
Fig. N° 4: Ladrillo Pandereta (Rayado).	6
Fig. N° 5: Ensayo de variación dimensional.....	7
Fig. N° 6: Ensayo de Alabeo.	10
Fig. N° 7: Ensayo de succión de unidades tubulares.....	13
Fig. N° 8: Ensayo de absorción: Unidades en el horno.	15
Fig. N° 9: Ensayo de Compresión de probetas de concreto: Columnas y Vigas de Confinamiento.....	18
Fig. N° 10: Malla Electrosoldada \varnothing 6mm cocada 150 mm x 150 mm.	20
Fig. N° 11: Detalle típico de pila de albañilería tubular reforzada.....	22
Fig. N° 12: Construcción de pilas de albañilería.	22
Fig. N° 13: Instalación de pila de albañilería para ensayo de compresión.....	23
Fig. N° 14: Fisura vertical a lo largo del espécimen en la Pila N° 02.....	24
Fig. N° 15: Disposición de los LVDT's en las pilas.	26
Fig. N° 16: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°01.....	26
Fig. N° 17: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°02.....	27
Fig. N° 18: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°03.....	27
Fig. N° 19: Detalle típico de murete de albañilería tubular reforzada.....	29
Fig. N° 20: Construcción de muretes de albañilería.....	30
Fig. N° 21: Colocación del reforzamiento y tarrajeo de los muretes de albañilería.....	30
Fig. N° 22: Instalación del murete para el ensayo.....	30
Fig. N° 23: Forma de falla de los muretes N°02 y N°03.	32
Fig. N° 24: Disposición de los LVDT's en los muretes.....	32
Fig. N° 25: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°01.	33
Fig. N° 26: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°02.	33
Fig. N° 27: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°03.	34
Fig. N° 28: Muro de albañilería y detalles de secciones de concreto para los confinamientos.....	42
Fig. N° 29: Detalle de la malla electrosoldada acero \varnothing 6mm, cocada 15 cm.....	43
Fig. N° 30: Transformación de la sección de concreto a albañilería.....	43
Fig. N° 31: habilitación de acero, encofrado y vaciado de la viga de cimentación.....	48
Fig. N° 32: Construcción de los muros de albañilería.	49
Fig. N° 33: Encofrado, vaciado y desencofrado de las columnas.....	50
Fig. N° 34: Colocación de acero, encofrado, vaciado y desencofrado de las vigas.....	51
Fig. N° 35: Colocación de la malla en los muros.....	52

Fig. N° 36: Interconexión de malla a través del muro con alambre #8 cada 45 cm.	52
Fig. N° 37: Tarrajeo de los muros con mortero cemento-arena fina (1:4).....	53
Fig. N° 38: Tarrajeo de columnas.....	53
Fig. N° 39: Ubicación de los LVDT's en los muros MR-01 y MR-02.....	55
Fig. N° 40: Disposición de la aplicación de cargas de fijación para el ensayo.....	55
Fig. N° 41: Preparación y equipamiento del muro para el ensayo.....	56
Fig. N° 42: Comportamiento Elástico sin presencia de fisuras – Fase 01 (MR-01).	57
Fig. N° 43: Fisuras horizontales en las columnas – Fase 02 (MR-01).....	58
Fig. N° 44: Medición de magnitud de la fisura – Fase 02 (MR-01).	58
Fig. N° 45: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 03 (MR-01).....	59
Fig. N° 46: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 04 (MR-01).....	59
Fig. N° 47: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 05 (MR-01).....	60
Fig. N° 48: Trituración de columnas en los talones (vista panorámica) – Fase 06 (MR-01).....	61
Fig. N° 49: Trituración de columnas en los talones – Fase 06 (MR-01).....	61
Fig. N° 50: Falla por deslizamiento del muro sobre la viga de cimentación (Longitud=14mm) – Fase 06 (MR-01).	61
Fig. N° 51: Comportamiento Elástico sin presencia de fisuras – Fase 01 (MR-02).	62
Fig. N° 52: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 02 (MR-02).....	62
Fig. N° 53: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 03 (MR-02).....	63
Fig. N° 54: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 04 (MR-02).....	63
Fig. N° 55: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 05 (MR-02).....	64
Fig. N° 56: Talón de columna triturado.....	64
Fig. N° 57: Trituración de columnas en los talones – Fase 06 (MR-02).....	65
Fig. N° 58: Falla por deslizamiento del muro sobre la viga de cimentación (Longitud= 15 mm) – Fase 06 (MR-02).	65
Fig. N° 59: Diagrama Tiempo vs. Desplazamiento del MR-01.....	66
Fig. N° 60: Diagrama Tiempo vs. Desplazamiento del MR-02.....	66
Fig. N° 61: Diagrama de Lazos Histeréticos para el muro MR-01.	67
Fig. N° 62: Diagrama de Lazos Histeréticos para el muro MR-02.	67
Fig. N° 63: Valores Máximos de Fuerza Cortante vs Desplazamiento.	69
Fig. N° 64: Valores Máximos de Esfuerzo Cortante vs Deriva.....	70
Fig. N° 65: Lazo Histerético Fase 01, muro MR-01 (Rango Elástico).....	71
Fig. N° 66: Lazo Histerético Fase 01, muro MR-02 (Rango Elástico).....	71
Fig. N° 67: Cálculo de la Rigidez Experimental del Muro MR-01 (Fase N° 01 rango lineal).	72
Fig. N° 68: Cálculo de la Rigidez Experimental del Muro MR-02 (Fase N° 01 rango lineal).	72
Fig. N° 69: Gráfica Fuerza versus Desplazamiento Vertical Muro MR-01.....	73
Fig. N° 70: Gráfica Fuerza versus Desplazamiento Vertical Muro MR-02.....	74
Fig. N° 71: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D3, MR-01.....	75
Fig. N° 72: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D4, MR-01.....	75
Fig. N° 73: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D3, MR-02.....	76

Fig. N° 74: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D4, MR-02..... 76

Fig. N° 75: Falla local concentrada en el murete. 78

Fig. N° 76: Tamaño máximo de grietas diagonales para MR-01 y MR-02..... 80

Fig. N° 77: Comparación de Envoltentes Cortante-Desplazamiento (Datos M1 y M2: Araoz y Velezmoro, 2012)..... 81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Determinación de la variación dimensional en la medida longitudinal.....	8
Tabla N° 2: Determinación de la variación dimensional en la medida transversal.....	8
Tabla N° 3: Determinación de la variación dimensional en la altura.....	9
Tabla N° 4: Determinación del alabeo.....	10
Tabla N° 5: Mediciones y resultados del ensayo de compresión.....	11
Tabla N° 6: Cálculo de la resistencia característica de la unidad.....	12
Tabla N° 7: Cálculo de la succión de la unidad.....	14
Tabla N° 8: Cálculo de la absorción de la unidad.....	15
Tabla N° 9: Clasificación de Unidades de Albañilería para fines estructurales. (Norma Técnica E.070 Albañilería, 2006)	16
Tabla N° 10: Cálculo de la resistencia a compresión de probetas de concreto de columnas ($f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$ (diseño)).	18
Tabla N° 11: Cálculo de la resistencia a compresión de probetas de concreto de la viga solera ($f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$ (diseño)).	19
Tabla N° 12: Factor de Corrección por esbeltez de $f'm$, Norma Técnica E.070.....	25
Tabla N° 13: Resultados de los ensayos de compresión axial de pilas de albañilería tubular.....	25
Tabla N° 14: Cálculo del Módulo de Elasticidad de pilas de albañilería tubular reforzada.....	28
Tabla N° 15: Resultados de los ensayos de compresión diagonal en muretes de albañilería tubular.....	31
Tabla N° 16: Cálculo del Módulo de Corte de muretes de albañilería tubular.....	34
Tabla N° 17: Carga teórica en la que alcanza el agrietamiento diagonal.....	36
Tabla N° 18: Fuerza cuando se presenta la primera fisura (tracción en el concreto).....	46
Tabla N° 19: Características de las fases en el ensayo de carga cíclica.....	56
Tabla N° 20: Puntos máximos asociados a la fuerza cortante (V) en cada fase para el muro MR-01.....	68
Tabla N° 21: Puntos máximos asociados a la fuerza cortante (V) en cada fase para el muro MR-02.....	69
Tabla N° 22: Cálculo de Rigidez (K) del Muro MR-01.....	73
Tabla N° 23: Cálculo de Rigidez (K) del Muro MR-02.....	73
Tabla N° 24: Cálculo del Módulo de Elasticidad (E_m) en los muros MR-01 y MR-02.....	74
Tabla N° 25: Cálculo del Módulo de Corte (G) en los muros MR-01 y MR-02.....	77
Tabla N° 26: Deformaciones unitarias registradas LVDT D5 y LVDT D6.....	79
Tabla N° 27: Deformaciones unitarias registradas LVDT D7 y/o LVDT D8.....	80

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. Introducción

Para la construcción de viviendas de pequeña altura, muchos son los factores a considerar como la economía, la sismicidad de la zona, el suelo de fundación, la seguridad, la practicidad, etc. Algunos de estos factores son determinantes para la elección del sistema estructural. La albañilería sigue siendo uno de los sistemas más empleados en gran parte de los países latinoamericanos así, el Perú no es ajeno a esta realidad según el último censo realizado a nivel nacional (Fig. N° 1) [Ref. 5].



Fig. N° 1: Material predominante en muros de viviendas censadas. (INEI, 2008)

Los muros de albañilería son elementos tradicionalmente empleados en la edificación de viviendas en gran parte de los países latinoamericanos. En el Perú el incremento de la población, de la demanda de viviendas y la falta de recursos en zonas críticas ocasionaron que la construcción se desarrolle incorrectamente. Esto sumado a la ausencia de conocimientos técnicos y profesionales, hicieron posible el uso inadecuado de materiales para edificar muros portantes (muros resistentes a cargas verticales y laterales) como es el caso de la unidad de albañilería tubular (ladrillo pandereta) (Fig. N° 2).



Fig. N° 2: Construcciones de 5 pisos con ladrillo pandereta. (Salinas y Lázares, 2007)

El ladrillo pandereta inicialmente se introdujo al mercado para la construcción de muros no portantes (tabiques, parapetos y cercos). Sin embargo, su costo reducido en comparación a un ladrillo estructural y la desinformación técnica determinaron el uso de este tipo de unidad para la edificación de muros portantes de edificaciones de hasta cinco niveles [Ref. 8]. Esto es muy peligroso por el carácter de falla frágil y explosiva que han tenido estos elementos en sismos reales, como el terremoto de Pisco en el 2007 (Fig. N° 3) [Ref. 9].



Fig. N° 3: Ladrillo pandereta en Pisco. (San Bartolomé, 2007)

Los resultados desastrosos del comportamiento de las edificaciones construidas con unidades de ladrillo pandereta en el terremoto de Pisco de 2007 demostraron su elevada vulnerabilidad. Además, la existencia de edificaciones construidas en la ciudad de Lima en zonas de bajos recursos y especialmente en zonas de alta sismicidad constituye un potencial problema social [Ref. 8]. Es por todo esto, necesario realizar un estudio experimental mediante ensayos de laboratorio, para determinar las propiedades mecánicas de este sistema estructural y analizar su comportamiento estructural con refuerzos, motivo de la presente tesis.

1.2. Antecedentes

En el Perú, los estudios en la albañilería tubular se iniciaron en el año 2007 cuando Salinas y Lázares hicieron ensayos de este sistema, en prismas de albañilería (pilas y muretes) y en muros a escala natural (2.65m de largo x 2.20m de alto) sometidos a carga lateral cíclica, determinándose las características de resistencia estructural de este sistema constructivo, concluyéndose que el comportamiento predominante fue sumamente frágil y explosivo a las acciones de cargas sometidas [Ref. 8].

En el 2012, Araoz y Velezmoro realizaron el primer estudio para plantear el reforzamiento con malla electrosoldada en muros de albañilería tubular. En este estudio se determinaron las propiedades de resistencia estructural de prismas de albañilería, además se ensayaron dos muros a escala natural (2.60m de largo x 2.20m de alto); uno sin reforzamiento y otro con el reforzamiento. Estos muros se ensayaron a carga lateral cíclica sin considerar el efecto de la carga vertical, determinándose un incremento de la resistencia máxima de hasta 42% más en el muro reforzado [Ref. 3].

El reforzamiento con malla electrosoldada de muros de albañilería confinada fueron alternativas de solución eficientes en investigaciones anteriores [Ref. 4], [Ref. 11]. Debido a que esta técnica de reforzamiento reduce la fragilidad e incrementa la ductilidad de este sistema estructural haciendo que se comporte

adecuadamente a la acción de cargas verticales y horizontales cíclicas, simultáneas.

1.3. Objetivos

La presente investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento mecánico de muros de albañilería tubular confinada, reforzados con malla electrosoldada ante cargas sísmicas y gravitacionales.

El estudio contempló ensayos de prismas de albañilería reforzados (pilas y muretes) para determinar el tipo de falla, sus características mecánicas y resistencia última. Además, se ensayaron dos muros a escala natural reforzados con malla electrosoldada, sometidos a cargas verticales representativas de una edificación de dos y tres niveles respectivamente, y cargas cíclicas laterales en simultáneo. De esta manera, se pudo analizar los tipos de falla que se producen en los muros, y entender mejor su comportamiento estructural.

1.4. Metodología

La metodología empleada en la investigación se describe a continuación:

- ◆ Diseño de los muros y planos de construcción.
- ◆ Construcción de los muros.
 - Construcción de las vigas de cimentación.
 - Asentado de muros.
 - Construcción de columnas de confinamiento.
 - Elaboración de probetas de concreto.
 - Construcción de vigas solera de confinamiento.
 - Elaboración de probetas de concreto.
 - Colocación de la malla electrosoldada y recubrimiento de mortero en los muros.
- ◆ Construcción de prismas de albañilería (pilas y muretes).
- ◆ Ensayos clasificatorios y no clasificatorios de la unidad de ladrillo tubular.
- ◆ Ensayos de probetas de concreto de los confinamientos.

- ◆ Definición de las fases de los ensayos y la instrumentación a utilizar.
- ◆ Ensayos de prismas de albañilería.
- ◆ Ensayo del muro sometido a carga lateral cíclica y carga vertical representativa de dos niveles.
- ◆ Ensayo del muro sometido a carga lateral cíclica y carga vertical representativa de tres niveles.
- ◆ Interpretación de resultados.
- ◆ Elaboración del informe.



CAPÍTULO 2: PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

En este capítulo se describirán las principales propiedades y características de los materiales empleados para la construcción de los muros debido a que éstas son determinantes en el proceso constructivo y en el comportamiento de los especímenes a ser ensayados.

2.1. Unidad de albañilería tubular

2.1.1. Características

Se emplearon unidades o ladrillos de arcilla calcinada, de forma tubular, denominados comercialmente ladrillos pandereta (Fig. N° 4). El ladrillo pandereta utilizado presenta una superficie rayada lo que permite mejorar la adherencia con el mortero cemento-arena. Las especificaciones técnicas del ladrillo utilizado son las siguientes:

Tipo:	Pandereta con superficie "Rayada".
Dimensiones:	9 x 11 x 22 cm.
Peso:	2.2 kg.
Arreglo:	32 Unidades/m ² en aparejo de sogá.
Utilización:	Tabiquería en exteriores.



Fig. N° 4: Ladrillo Pandereta (Rayado).

2.1.2. Ensayos clasificatorios

A.- Variación dimensional

Las dimensiones largo x ancho x altura se tomaron como el promedio de las cuatro medidas (en milímetros) hechas en la parte intermedia de las superficies correspondientes, como se muestra en la Fig. N° 5 para la altura “H”.

Según la Norma Técnica E.070, la variación dimensional de cada arista de la unidad se determinará como el cociente entre la desviación estándar y el valor promedio de la muestra multiplicado por 100 según la siguiente ecuación:

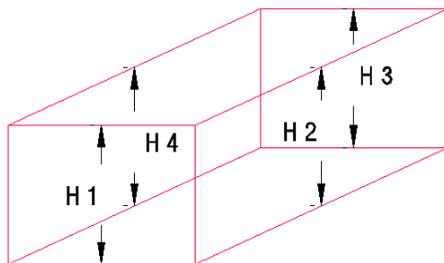
$$V(\%) = \frac{\sigma}{x} \times 100$$

Donde:

V(%) : Variabilidad dimensional en %.

σ : Desviación estándar.

x : Dimensión promedio.



$$H_p = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}$$

Fig. N° 5: Ensayo de variación dimensional.

El ensayo se realizó con una muestra representativa de 10 unidades de ladrillo pandereta, de un lote total de 600 unidades. Los resultados se indican en las Tablas N°1, N°2, y N°3 para cada una de las tres dimensiones.

Tabla N° 1: Determinación de la variación dimensional en la medida longitudinal.

Muestra	Largo (mm)						
N°	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L _o	σ	V (%)
01	213.6	212.0	214.0	213.6	213.3	0.9	0.4
02	215.0	215.7	215.3	214.8	215.2	0.4	0.2
03	214.1	215.1	215.0	214.7	214.7	0.5	0.2
04	216.0	217.1	217.5	216.9	216.9	0.6	0.3
05	218.1	217.0	217.5	217.6	217.6	0.5	0.2
06	212.3	213.1	212.5	213.0	212.7	0.4	0.2
07	216.0	215.5	216.3	215.9	215.9	0.3	0.2
08	212.1	212.7	212.6	213.0	212.6	0.4	0.2
09	215.1	214.9	214.8	214.9	214.9	0.1	0.1
10	215.0	215.8	215.6	214.6	215.3	0.6	0.3
					L _p	214.9	
					σ	1.7	
					V (%)	0.8	

Tabla N° 2: Determinación de la variación dimensional en la medida transversal.

Muestra	Ancho (mm)						
N°	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A _o	σ	V (%)
01	107.3	107.5	107.4	107.6	107.5	0.1	0.1
02	109.0	108.8	109.3	108.9	109.0	0.2	0.2
03	108.5	109.0	108.7	108.8	108.8	0.2	0.2
04	107.1	107.2	107.5	107.0	107.2	0.2	0.2
05	109.1	108.9	109.1	108.9	109.0	0.1	0.1
06	108.1	107.7	107.8	108.2	108.0	0.2	0.2
07	107.7	108.0	107.9	107.5	107.8	0.2	0.2
08	106.9	107.5	107.3	106.9	107.2	0.3	0.3
09	107.2	108.0	108.1	108.2	107.9	0.5	0.4
10	107.1	107.4	107.6	107.8	107.5	0.3	0.3
					A _p	108.0	
					σ	0.7	
					V (%)	0.7	

Tabla N° 3: Determinación de la variación dimensional en la altura.

Muestra	Altura (mm)						
	N°	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H o	σ
01	89.3	90.0	89.6	89.5	89.6	0.3	0.3
02	90.5	90.2	90.1	89.9	90.2	0.2	0.3
03	89.1	89.4	89.5	89.0	89.3	0.2	0.3
04	90.3	90.0	89.9	90.1	90.1	0.2	0.2
05	90.2	90.5	89.9	89.8	90.1	0.3	0.4
06	89.7	89.9	90.2	90.1	90.0	0.2	0.2
07	90.2	90.7	90.8	90.5	90.6	0.3	0.3
08	90.2	89.8	89.5	89.6	89.8	0.3	0.3
09	91.0	90.8	90.9	90.7	90.9	0.1	0.1
10	90.9	91.0	90.7	90.8	90.9	0.1	0.1
				Hp	90.1		
				σ	0.5		
				V (%)	0.6		

B.- Alabeo

Este ensayo determina la concavidad o convexidad que presentan las caras de asiento de la unidad de albañilería. La presencia de alabeo puede afectar el espesor de la junta horizontal.

El alabeo influye en la adherencia ladrillo-mortero por la posible presencia de vacíos en zonas alabeadas y cuyo resultado puede ocasionar fallas de tracción por flexión en la unidad.

El ensayo se realizó colocando la superficie de asiento de la unidad sobre la mesa plana. Se midió el alabeo en cada diagonal de la cara de asiento con una regla metálica y la cuña graduada al milímetro. Si la cara de medición presenta concavidad, se introduce la cuña en la zona que presente la mayor deflexión; y si la cara presenta convexidad, se adecua la regla metálica hasta que se presente valores iguales en los extremos (Fig. N° 6).



Fig. N° 6: Ensayo de Alabeo.

Los resultados obtenidos al medir la concavidad o convexidad se promediaron y expresaron en milímetros para una muestra de diez unidades (Tabla N° 4).

Tabla N° 4: Determinación del alabeo.

Muestra N°	Cara Superior (mm)		Cara Inferior (mm)	
	Concavidad	Convexidad	Concavidad	Convexidad
01	0.5	0.0	0.0	0.0
02	0.5	0.0	0.0	0.0
03	0.0	0.0	0.5	0.0
04	0.0	0.0	0.0	0.0
05	0.0	0.5	0.0	0.0
06	0.0	0.0	0.0	0.0
07	0.0	0.0	0.0	0.0
08	0.0	0.5	0.0	0.0
09	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.5	0.0	0.5
Promedio	Concavidad	0.075		mm
	Convexidad	0.100		mm

C.- Resistencia a la compresión de la unidad de albañilería tubular (f'b)

El ensayo de compresión se realizó con una muestra representativa de 5 unidades enteras de un lote de 600 unidades. Este ensayo nos permite determinar la resistencia a compresión axial.

Para realizar el ensayo, previamente se colocaron las unidades al horno por 24 horas a una temperatura de 110°C para eliminar la humedad natural. A las unidades secas se les colocó el capping de azufre en las superficies de contacto entre la unidad y el cabezal del equipo esto para poder uniformizar la transmisión de esfuerzos en el proceso de ensayo. Primeramente, se tomaron las dimensiones de cada unidad (Tabla N° 5).

Tabla N° 5: Mediciones y resultados del ensayo de compresión.

Muestra	Largo (mm)		Ancho (mm)		Alto (mm)		Peso Seco	Carga Máxima
	L ₁	L ₂	A ₁	A ₂	H ₁	H ₂	(gr)	(kgf)
01	213.0	213.2	107.2	107.2	89.3	89.5	2052.9	14143
02	215.0	215.5	109.2	109.2	90.5	90.3	2097.1	13572
03	214.1	214.3	108.5	108.7	89.1	89.2	2250.3	14266
04	216.0	216.5	107.1	107.8	90.3	90.5	2209.0	18620
05	218.1	218.3	109.1	108.9	90.8	90.5	2254.9	16112

La resistencia a compresión de cada unidad (**fb**) se calculó como el cociente entre la carga máxima de rotura y el área bruta del espécimen. La resistencia característica a compresión (**f'b**) se obtuvo restando una desviación estándar del valor promedio (Tabla N° 6).

$$fb = \frac{P}{A}$$

$$f'b = fb - \sigma$$

Donde:

f'b : Resistencia característica a compresión.

fb : Resistencia a compresión de una unidad.

P : Carga máxima de rotura de la unidad.

A : Área bruta de la unidad.

σ : Desviación estándar.

Tabla N° 6: Cálculo de la resistencia característica de la unidad.

Muestra	Lprom	Aprom	Carga Máxima	Área Bruta	f' b
N°	(mm)	(mm)	(kgf)	(cm ²)	(kgf/cm ²)
01	213.1	107.2	14143.0	228.4	61.91
02	215.3	109.2	13572.0	235.1	57.74
03	214.2	108.6	14266.0	232.6	61.33
04	216.3	107.5	18620.0	232.4	80.13
05	218.2	109.0	16112.0	237.8	67.74
fb (kgf/cm²)					65.8
σ (kgf/cm²)					8.8
f' b (kgf/cm²)					57

Por lo que la resistencia característica a compresión axial de la unidad de albañilería tubular (f' b) fue **57 kgf/cm²**.

2.1.3. Ensayos no clasificatorios

Estos ensayos no intervienen en la clasificación de las unidades de albañilería, pero su estudio es importante y fundamental para definir el correcto proceso constructivo que se siguieron en la construcción de los muros de albañilería tubular para los ensayos.

A.- Succión

El ensayo de succión mide la velocidad con que las unidades de albañilería absorben el agua del mortero en el momento del asentado de las unidades. Hay una relación de correspondencia con la adherencia ladrillo-mortero ya que esta se ve afectada si el ladrillo presenta una elevada succión. Si fuera este el caso se deberá realizar un tratamiento de humedecimiento previo asentado de las unidades.

Se realizó en seis unidades, las cuales se secaron previamente en un horno por 24 horas a una temperatura de 110°C. Posteriormente se pesaron las unidades para determinar su peso seco.

Se colocó cada unidad en una bandeja apoyada en cuñas para dejar que fluya el agua a lo largo de la superficie de asiento por un tiempo de un minuto (Fig. N° 7). Una vez concluido este tiempo, se midió el peso de la unidad (Peso Sumergido).



Fig. N° 7: Ensayo de succión de unidades tubulares.

La succión se expresa en gramos por minuto en un área normalizada de 200 cm², se determinaron para cada unidad con la siguiente fórmula y están dados en la Tabla N° 7.

$$S = \frac{200 \times (P_h - P_s)}{A}$$

Donde:

S : Succión en (gr/ (200 cm²- min)).

P_h : Peso de la unidad luego de ser sumergido en agua un minuto (gr).

P : Peso seco de la unidad (gr).

A : Área de la superficie de asiento: Largo x Ancho (cm²).

Tabla N° 7: Cálculo de la succión de la unidad.

Muestra	Largo	Ancho	Alto	Peso Seco	Peso Sumergido (t = 1 min)	Succión
N°	(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(gr)	gr/(200cm ² - min)
06	212.3	108.1	89.7	2268.2	2310.1	36.5
07	216.0	107.7	90.2	2278.0	2321.6	37.5
08	212.1	106.9	90.2	2094.8	2135.2	35.6
09	215.1	107.2	91.0	2099.1	2139.1	34.7
10	215.0	107.1	90.9	2160.0	2200.4	35.1
11	214.7	106.7	90.5	2072.4	2118.2	40.0
Succión Promedio						37

Según la Norma Técnica E.070, se especifica que la succión de los ladrillos debe estar comprendida entre los 10 y 20 gr/ (200 cm²- min). Para el caso determinado se cálculo una succión promedio (**S**) de **37 gr/ (200 cm²- min)**, el cual excede el límite máximo reglamentario por lo que se hizo un tratamiento regándose durante 30 minutos unas 12 horas previas al asentado de los muros para así evitar que la unidad succione el agua del mortero de las juntas.

B.- Absorción

La absorción está directamente relacionada con la resistencia al intemperismo (durabilidad). Mientras una unidad sea más absorbente esto indicará que la unidad es porosa por lo que será más vulnerable a la humedad, el intemperismo y a su deterioro gradual en el tiempo.

Se emplearon 6 unidades las cuales previamente se secaron en un horno por 24 horas (Fig. N° 8) para determinar su peso (Peso Seco), luego se enfriaron por aproximadamente cuatro horas para posteriormente sumergirlas enteramente en agua en un recipiente durante 24 horas y finalmente se procedió a pesarlos (Peso Saturado).



Fig. N° 8: Ensayo de absorción: Unidades en el horno.

Para el cálculo de la absorción se aplicó la siguiente fórmula y su resultado se expresó en porcentaje (Tabla N° 8).

$$A(\%) = \frac{100 \times (\text{Peso Saturado} - \text{Peso Seco})}{\text{Peso Seco}}$$

Tabla N° 8: Cálculo de la absorción de la unidad.

Muestra	Peso Seco	Peso Saturado	Absorción
N°	(gr)	(gr)	(%)
06	2268.2	2568.1	13.2%
07	2278.0	2581.3	13.3%
08	2094.8	2353.2	12.3%
09	2099.1	2373.3	13.1%
10	2160.0	2444.9	13.2%
11	2072.4	2344.7	13.1%
		Promedio	13.0%

La absorción promedio (**A**) fue de **13%** cuyo valor es menor que el límite máximo estipulado por la Norma Técnica E.070 para los ladrillos de arcilla (22%).

2.1.4. Evaluación de resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos clasificatorios determinan que la unidad se clasifique como Ladrillo I, según la Norma Técnica E.070 por su resistencia característica a compresión ($f'b = 57 \text{ kgf/cm}^2$) (Tabla N° 9).

Tabla N° 9: Clasificación de Unidades de Albañilería para fines estructurales. (Norma Técnica E.070 Albañilería, 2006)

CLASE	VARIACIÓN DE LA DIMENSIÓN (máxima en porcentaje)			ALABEO (máximo en mm)	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN f'b mínimo en Mpa(kgf/cm ²) sobre área bruta
	Hasta 100 mm	Hasta 150 mm	Más de 150 mm		
Ladrillo I	± 8	± 6	± 4	10	4.9 (50)
Ladrillo II	± 7	± 6	± 4	8	6.9 (70)
Ladrillo III	± 5	± 4	± 3	6	9.3 (95)
Ladrillo IV	± 4	± 3	± 2	4	12.7 (130)
Ladrillo V	± 3	± 2	± 1	2	17.6 (180)
Bloque P¹	± 4	± 3	± 2	4	4.9 (50)
Bloque NP²	± 7	± 6	± 4	8	2.0 (20)

(1) Bloque usado en la construcción de muros portantes

(2) Bloque usado en la construcción de muros no portantes

2.2. Cemento

Es un conglomerante hidráulico, que al ser mezclado con el agua y los agregados se origina una mezcla uniforme, plástica y resistente a la compresión a una edad temprana. Para el presente proyecto de investigación se utilizó el Cemento Portland tipo I.

2.3. Agregados

Para el proyecto de investigación se emplearon los siguientes agregados:

- Agregado fino (arena): Partículas menores de 4.75 mm (Malla Standard ASTM #4) y mayor de 0.075 mm (Malla Standard ASTM #200).

- Agregado grueso (piedra chancada): Partículas mayores de 4.75 mm (Malla Standard ASTM #4).

Los agregados empleados fueron libres de material orgánico e impurezas lo cual se verificó de manera visual.

2.4. Agua

El agua empleada en la mezcla de concreto y mortero fue el agua potable, libre de materia orgánica e impurezas.

2.5. Mortero

El mortero es el resultado de la mezcla del cemento, agregado fino y agua. Su función principal es la de adherir horizontal y verticalmente las unidades de albañilería, para el caso de la construcción de especímenes de los ensayos se empleó una proporción de cemento-arena gruesa (1:4) para las juntas y una proporción de cemento-arena fina (1:4) para el tarrajeo empleado en la construcción. La cantidad de agua fue regulada por el albañil en función de la trabajabilidad del mortero.

2.6. Concreto

El concreto es el producto resultante de la mezcla del cemento, arena, piedra chancada y agua, para los elementos de confinamiento tales como columnas y vigas del muro se emplearon el siguiente diseño de mezclas como se describe a continuación:

Concreto $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ viga de cimentación.

Dosificación en volumen:

Cemento	:	1.00
Arena	:	2.00
Piedra Chancada	:	3.00
Agua	:	0.80

Concreto $f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$ columnas y vigas soleras.

Dosificación en volumen:

Cemento	:	1.00
Arena	:	2.50
Piedra Chancada	:	3.50
Agua	:	0.90

Para garantizar la resistencia requerida para efectos del ensayo, se realizaron pruebas a compresión axial de probetas cilíndricas de tamaño estándar de 6" de diámetro y 12" de altura (Fig. N° 9). Los ensayos fueron realizados a una edad de 28 días y en número de tres testigos por elemento según (Tabla N° 10 y Tabla N° 11).



Fig. N° 9: Ensayo de Compresión de probetas de concreto: Columnas y Vigas de Confinamiento.

Tabla N° 10: Cálculo de la resistencia a compresión de probetas de concreto de columnas ($f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$ (diseño)).

Especimen	Fecha de Vaciado	Diámetro (cm)			Carga	Esfuerzo
		D1	D2	D prom	Máxima	$f'c$
					(kN)	(kgf/cm ²)
C-01	23/09/2013	15.1	15.0	15.1	341.1	195.0
C-02	23/09/2013	14.9	15.0	15.0	347.2	201.2
C-03	23/09/2013	15.1	15.1	15.1	379.1	216.6
Promedio (kgf/cm²)						204.2
Desviación (kgf/cm²)						11.1
$f'c$ (kgf/cm²)						190.0

Tabla N° 11: Cálculo de la resistencia a compresión de probetas de concreto de la viga solera ($f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$ (diseño)).

Espécimen	Fecha de Vaciado	Diámetro (cm)			Carga	Esfuerzo
		D1	D2	D prom	Máxima	$f'c$
					(kN)	(kgf/cm^2)
V-01	25/09/2013	15.3	15.1	15.2	349.8	196.3
V-02	25/09/2013	15.7	15.7	15.7	370.8	194.4
V-03	25/09/2013	15.1	15.2	15.2	331.0	187.2
					Promedio (kgf/cm^2)	192.7
					Desviación (kgf/cm^2)	4.8
					$f'c$ (kgf/cm^2)	185.0

2.7. Acero de refuerzo

El refuerzo utilizado es denominado fierro corrugado ASTM A-615 Grado 60. Son barras de acero micro aleado de alta ductilidad, rectas de sección circular y con resaltes a lo largo de su superficie para mejorar la adherencia con el concreto.

Propiedades Mecánicas:

Límite de fluencia (f_y)	:	4 280 kgf/cm^2 .
Resistencia a la tracción (R)	:	6 320 kgf/cm^2 .
Relación (R/ f_y)	:	≥ 1.25 .

Los diámetros empleados para la construcción de los muros son como siguen a continuación:

Vigas de Cimentación	:	$\varnothing 5/8$ " longitudinal y $\varnothing 3/8$ " estribos.
Columnas de confinamiento	:	$\varnothing 1/2$ " longitudinal y $\varnothing 6\text{mm}$ estribos.
Vigas Soleras	:	$\varnothing 3/8$ " longitudinal y $\varnothing 6\text{mm}$ estribos.

2.8. Malla electrosoldada

El acero destinado para la fabricación de la malla electrosoldada (Fig. N° 10) cumple con la Norma **ASTMA496/A 496M-05a** "Especificaciones standard para el alambre corrugado utilizando como refuerzo en el concreto" y la Norma

ASTMA497/A 497M-05a “Especificaciones para la fabricación de mallas electrosoldadas corrugadas utilizando como refuerzo en el concreto”.

Propiedades de la Malla Electrosoldada:

Límite de fluencia (f_y)	:	5 000 kgf/cm ² .
Resistencia a la Rotura (f_r)	:	5 600 kgf/cm ² .
Medida	:	2.40 m x 6.00 m.
Cocada	:	150 mm x 150 mm.
Diámetro	:	6 mm.
Peso	:	2.96 kgf/m ² .

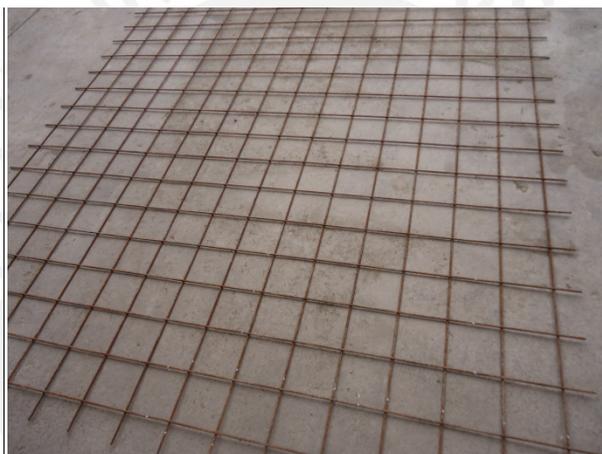


Fig. N° 10: Malla Electrosoldada \varnothing 6mm cocada 150 mm x 150 mm.

CAPÍTULO 3: PRISMAS DE ALBAÑILERÍA TUBULAR

Los prismas de albañilería tubular son pequeños especímenes que nos permiten predecir el comportamiento de los muros de albañilería, para nuestro caso específico se realizaron ensayos de pilas y muretes incluyendo el reforzamiento con la malla electrosoldada.

3.1. Pilas de albañilería

Las pilas de albañilería son prismas compuestos por seis hiladas de unidades enteras asentadas una sobre otra mediante mortero, con una altura total que facilite su construcción, almacenaje y transporte hacia los equipos de ensayo en el laboratorio. Para el caso de ensayo se construyeron tres pilas de albañilería reforzada con la malla electrosoldada (Fig. N° 11) con la finalidad de determinar la resistencia característica a compresión ($f'm$) y el módulo de elasticidad (E_m).

Para efectos de ensayo se colocó un capping de yeso-cemento para garantizar el contacto entre los extremos de la pila y los cabezales planos de ensayo.

3.1.1. Características

Dimensiones : 22 cm x 16 cm x 62 cm. (6 hiladas).

Tipo de ladrillo : Ladrillo Pandereta Rayado.

Espesor de juntas: 15 mm.

Espesor de tarrajeo: 25 mm.

Dosificación del mortero juntas: 1:4 (cemento: arena)

Dosificación del mortero tarrajeo: 1:4 (cemento: arena)

Capping: Yeso-Cemento en cada extremo colocado un día antes del ensayo.

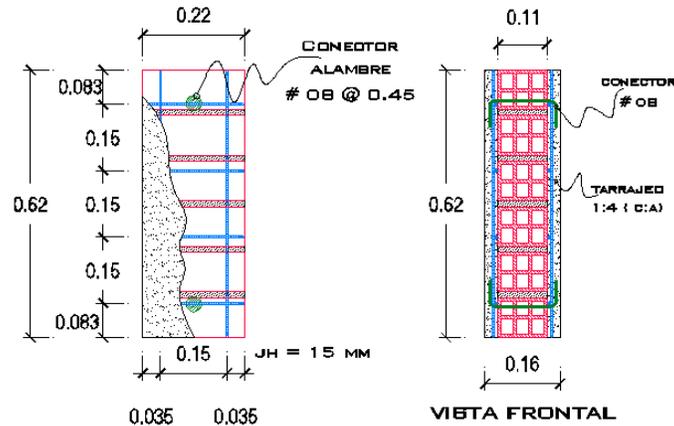


Fig. N° 11: Detalle típico de pila de albañilería tubular reforzada.

3.1.2. Procedimiento de construcción

Las unidades de albañilería fueron humedecidas por 30 minutos un día previo al asentado de las pilas.

Los ladrillos se colocaron en cada hilada uniéndolas con el mortero, verificándose el aplome y verticalidad hasta alcanzar las seis hiladas (Fig. N° 12).

Se realizó la colocación de la malla a través de un conector de alambre #8 en dos puntos a 45 cm.

Se realizó el tarrajeo de la superficie reforzada con malla electrosoldada.

Un día previo al ensayo se colocó el capping de yeso-cemento en los extremos para garantizar la transmisión de esfuerzos de una manera uniforme hacia el testigo de albañilería.

El ensayo se realizó a una edad de 28 días de haberse construido las muestras.



Fig. N° 12: Construcción de pilas de albañilería.

3.1.3. Instrumentación y montaje

Las pilas de albañilería fueron instaladas por el personal técnico del laboratorio, se centró debidamente con respecto a los ejes de los cabezales para la aplicación de la fuerza como se aprecia en la Fig. N°13.

Se colocaron dos LVDT's en cada pila para poder registrar los desplazamientos a lo largo de la aplicación de la carga de compresión axial.

La velocidad de aplicación de la carga para el ensayo fue de 5 tonf/min, se empleó una gata hidráulica de 200 toneladas y una celda de carga para el registro del voltaje al momento de la aplicación de la carga. Se usó el programa LABVIEW para poder transformar el voltaje registrado en carga.

Se realizó el retiro de la instrumentación a un nivel de carga aceptable según inspección visual para evitar el daño por la posible falla de los especímenes.



Fig. N° 13: Instalación de pila de albañilería para ensayo de compresión.

La falla presentada en las pilas fue concentrada principalmente en la unidad generándose grietas verticales y no se presento fallas explosivas en los testigos (Fig. N°14).



Fig. N° 14: Fisura vertical a lo largo del espécimen en la Pila N° 02.

3.1.4. Cálculo de la resistencia a compresión axial

La resistencia a compresión axial de las pilas de albañilería se obtiene de la relación entre la carga máxima sobre el área bruta de la pila.

$$f_m = \frac{P \text{ máx}}{\text{Área}}$$

Donde:

f_m : Resistencia a compresión axial (kgf/cm²).

$P \text{ máx}$: Fuerza máxima de resistencia a compresión de la pila (kgf).

Área : Área bruta transversal a la fuerza (cm²).

La resistencia característica se obtiene al restar una desviación estándar a la resistencia promedio.

$$f'_m = f_m - \sigma$$

Donde:

$f'm$: Resistencia característica a compresión axial (kgf/cm²).

σ : Desviación estándar (kgf/cm²).

Según la Norma Técnica se realizó la corrección por esbeltez según la Tabla N°12 y los resultados de los cálculos fueron expresados en la Tabla N°13.

Tabla N° 12: Factor de Corrección por esbeltez de $f'm$, Norma Técnica E.070.

Esbeltez	2.0	2.5	3.0	4.0	4.5	5.0
Factor	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0

Tabla N° 13: Resultados de los ensayos de compresión axial de pilas de albañilería tubular.

Especimen	Dimensiones			Esbeltez (H / t)	P máx (Tonf)	Área (cm ²)	$f'm$ (kgf/cm ²)	Factor Corrección	$f'm$ Corregido (kgf/cm ²)
	Largo	Alto	Espesor						
	L (mm)	H (mm)	t (mm)						
Pila N°01	225.0	622.0	157.0	3.96	11.6	353.3	32.74	0.948	31.1
Pila N°02	225.0	622.0	160.0	3.89	16.5	360.0	45.82	0.946	43.3
Pila N°03	226.0	622.0	156.0	3.99	11.1	352.6	31.56	0.949	30.0
Promedio (kgf/cm²)									34.8
Desviación (kgf/cm²)									7.4
$f'm$ (kgf/cm²)									27

Por lo que la resistencia característica a compresión axial de las pilas de albañilería reforzada ($f'm$) fue **27 kgf/cm²**.

3.1.5. Cálculo del módulo de elasticidad

Para determinar el módulo de elasticidad de las pilas de albañilería tubular reforzada se dispuso la colocación de dos instrumentos de medición de deformaciones (LVDT's) en los lados tarrajeados para las tres pilas ensayadas (Fig. N°15). Las figuras N°16, N°17 y N°18 representan el registro promedio de las cargas y deformaciones obtenidas de los ensayos para cada pila.

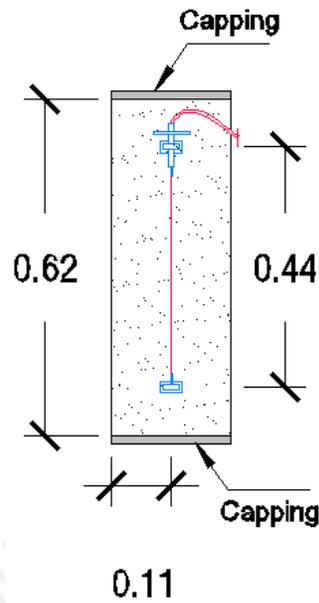


Fig. N° 15: Disposición de los LVDT's en las pilas.

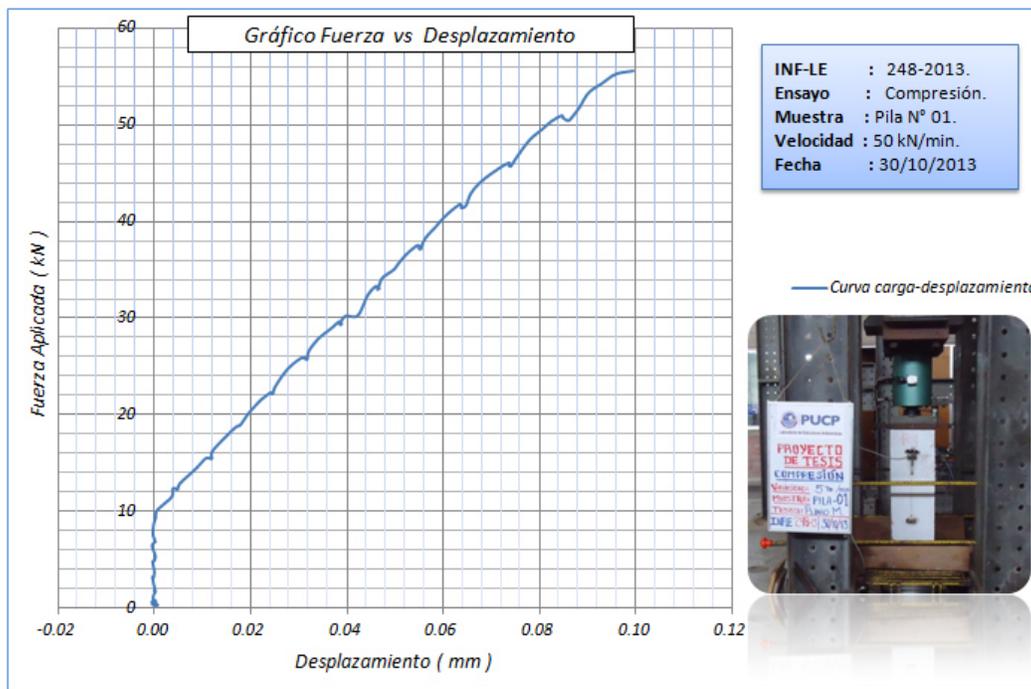


Fig. N° 16: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°01.

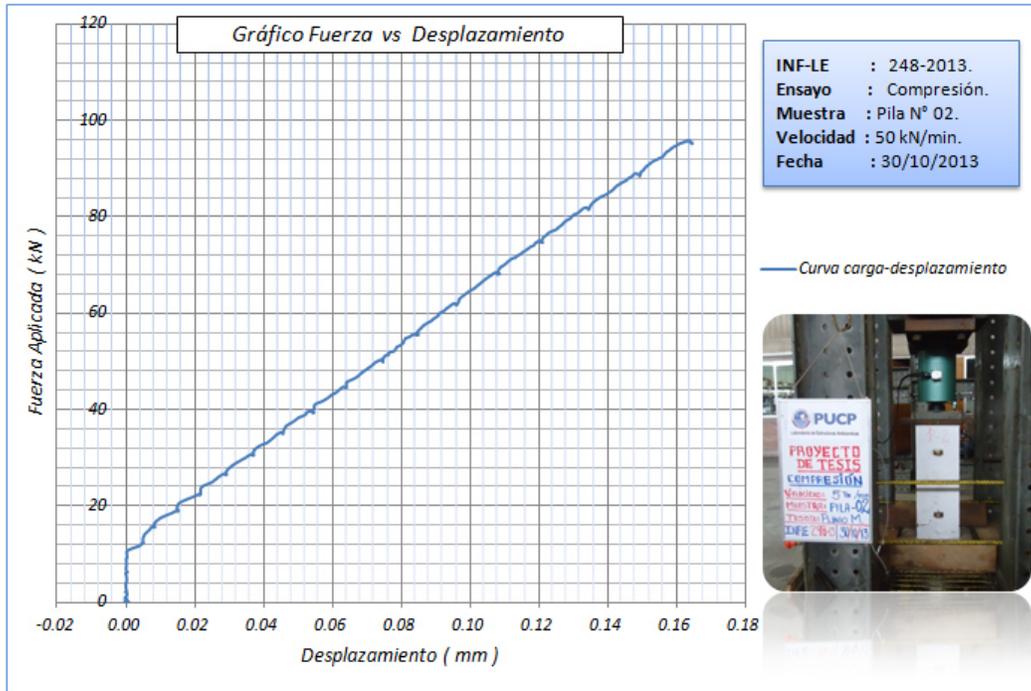


Fig. N° 17: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°02.

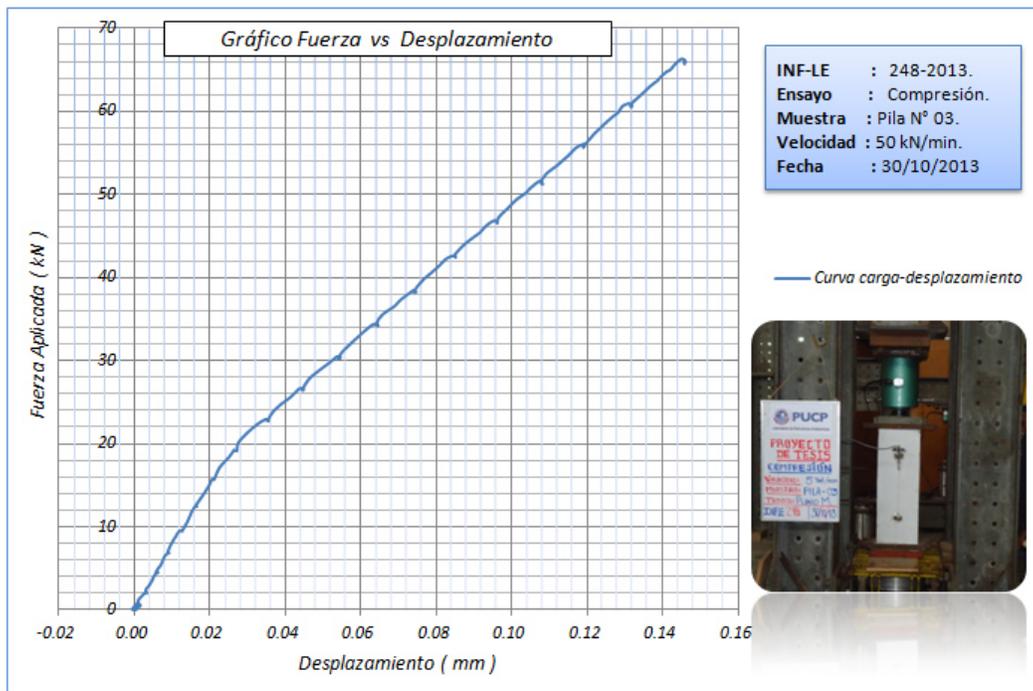


Fig. N° 18: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento de la Pila N°03.

Los cálculos realizados para determinar el módulo de elasticidad fueron expresados en la Tabla N°14.

Tabla N° 14: Cálculo del Módulo de Elasticidad de pilas de albañilería tubular reforzada.

Especímen	Distancia	Área	$\Delta P / \Delta D$	E m	E m
	LVDT (mm)	(cm ²)	(kN/mm)	(MPa)	(kgf/cm ²)
Pila N°01	443.0	353.3	486.0	6095.0	6.22E+04
Pila N°02	443.0	360.0	524.9	6459.0	6.59E+04
Pila N°03	443.0	352.6	394.5	4957.0	5.06E+04
E prom (kgf/cm²)					5.95E+04
Desviación (kgf/cm²)					0.80E+04

Por lo que el módulo de elasticidad de las pilas de albañilería tubular reforzada (**Em**) fue **59 500 kgf/cm²**.

3.2. Muretes de albañilería

Se construyeron tres muretes de albañilería aplicando el reforzamiento con malla de acero electrosoldada (Fig. N°19), los cuales fueron ensayados a compresión diagonal. Este ensayo nos permite calcular la resistencia a fuerza cortante (**v'm**) y el módulo de corte (**Gm**) de la albañilería tubular reforzada. La información permitió predecir la carga de agrietamiento diagonal de los muros a escala natural y la forma de falla característica.

3.2.1. Características

Dimensiones: 0.62 m de ancho, 0.62 m de alto y 0.16 m de espesor.

Tipo de ladrillo : Ladrillo Pandereta Rayado.

Espesor de juntas verticales: 15 mm.

Espesor de juntas horizontales: 15 mm.

Espesor de tarrajeo: 25 mm.

Dosificación del mortero juntas: 1:4 (cemento: arena)

Dosificación del mortero tarrajeo: 1:4 (cemento: arena)

Capping: Mezcla de Yeso-Cemento colocada en las esquinas opuestas de cada murete un día antes del ensayo.

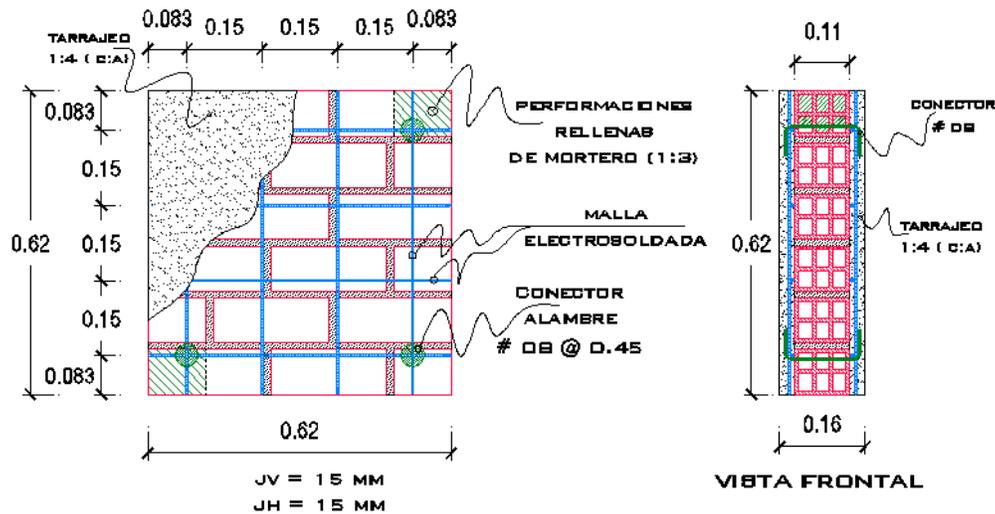


Fig. N° 19: Detalle típico de murete de albañilería tubular reforzada.

3.2.2. Procedimiento de construcción

Las unidades de albañilería fueron tratadas (regadas por 30 minutos) un día previo al asentado de los muretes.

Primero se dispuso la colocación de los ladrillos guías para cada hilada empleándose cordel y plomada para controlar la verticalidad, luego se procedió a colocar los ladrillos intermedios empleando el alineamiento de los ladrillos guías con el respectivo cordel y aplome para cada ladrillo. Se verificaron siempre que los espesores de juntas verticales y horizontales no excedan los permitidos según las dimensiones del murete (Fig. N°20).

Se procedió a rellenar los alvéolos de las esquinas opuestas con mortero para evitar un tipo de falla local al momento de ser ensayado.

Se realizó la colocación de la malla a través de un conector de alambre #8 en cuatro puntos a 45 cm.

Se realizó el tarrajeo de la superficie reforzada con malla electrosoldada (Fig. N°21).

Un día previo al ensayo se colocó el capping de yeso-cemento en los extremos opuestos donde se rellenaron los alvéolos con mortero para garantizar la transmisión de esfuerzos de una manera uniforme hacia el testigo de albañilería.

El ensayo se realizó a una edad de 28 días de haberse construido las muestras.



Fig. N° 20: Construcción de muretes de albañilería.



Fig. N° 21: Colocación del reforzamiento y tarrajeo de los muretes de albañilería.

3.2.3. Instrumentación y montaje

El transporte y montaje de los muretes se realizó en un equipo de izaje y a través del puente grúa del laboratorio. Para la medición de deformaciones al momento del ensayo se dispuso la colocación de dos LVDT's ortogonales como se aprecia en la Fig. N°22.



Fig. N° 22: Instalación del murete para el ensayo.

Para generar la carga se dispuso de una maquina de ensayos, formado por: una gata hidráulica de 200 toneladas y una bomba hidráulica de 600 bar de capacidad. El funcionamiento del equipo está basado en medir en forma continua tanto la fuerza como las deformaciones. La carga se aplicó de forma monotonica y constante a una velocidad de 1 tonf/min hasta que se llegara a la rotura del murete.

3.2.4. Cálculo de la resistencia al corte en ensayo de compresión diagonal

Para determinar la resistencia a corte diagonal de los muretes, se empleo la siguiente fórmula:

$$v'm = \frac{P_{max}}{A_d}$$

Donde:

$v'm$: Resistencia al corte diagonal.

P_{max} : Máxima fuerza que resiste el murete.

A_d : Área diagonal del murete.

La resistencia característica ($v'm$) se obtiene al restar la desviación estándar a la resistencia a corte promedio de todos los muretes ensayados.

Los resultados de los cálculos se muestran a continuación en la Tabla N°15.

Tabla N° 15: Resultados de los ensayos de compresión diagonal en muretes de albañilería tubular.

Especimen	Dimensiones				P máx (Tonf)	Área (cm ²)	v ' m (kgf/cm ²)
	Largo	Alto	Espesor	Diagonal			
	L (mm)	H (mm)	t (mm)	D (mm)			
Murete N°01	619.0	618.0	156.0	874.7	12.1	1364.5	8.8
Murete N°02	619.0	619.0	158.0	875.4	15.8	1383.1	11.5
Murete N°03	620.0	620.0	160.0	876.8	17.9	1402.9	12.7
Promedio (kgf/cm²)							11.0
Desviación (kgf/cm²)							2.0
v ' m (kgf/cm²)							9.0

Por lo que la resistencia a compresión diagonal de los muretes de albañilería tubular reforzada ($v'm$) fue **9.0 kgf/cm²**.



Fig. N° 23: Forma de falla de los muretes N°02 y N°03.

La forma de falla de los muretes no fue explosiva, tampoco fallaron de forma frágil, mas se concentraron en los apoyos de aplicación de la carga (falla local) y se presentaron fisuras de tracción diagonal de hasta 0.80 mm (Fig. N°23).

3.2.5. Cálculo del módulo de corte

Para determinar el módulo de corte de los muretes de albañilería tubular reforzada, se dispuso la colocación de dos instrumentos de medición de deformaciones (LVDT's) según las diagonales principales como se muestra en la Fig. N°24 para los tres muretes ensayados.

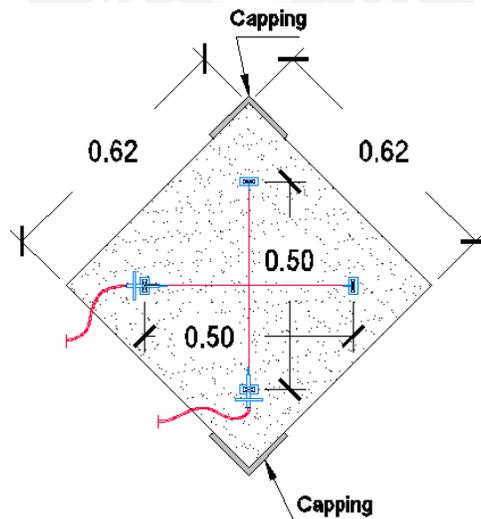


Fig. N° 24: Disposición de los LVDT's en los muretes.

Las figuras N°25, N°26 y N°27 muestran los registros de cargas y desplazamientos obtenidos en los ensayos para cada murete.

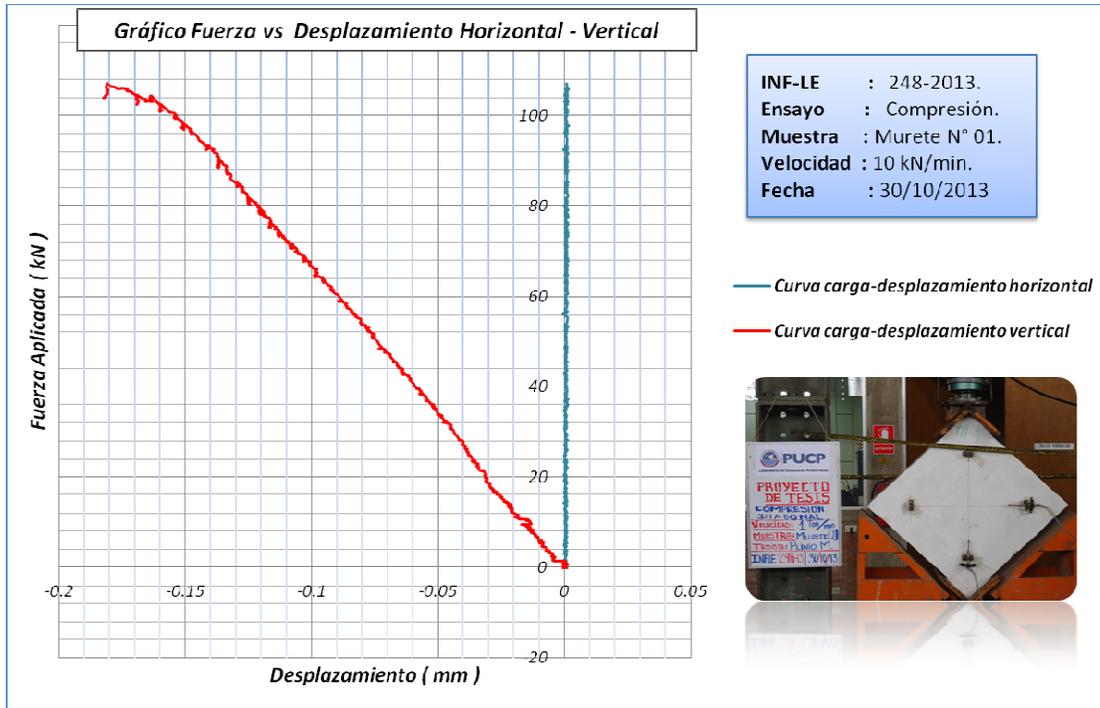


Fig. N° 25: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°01.

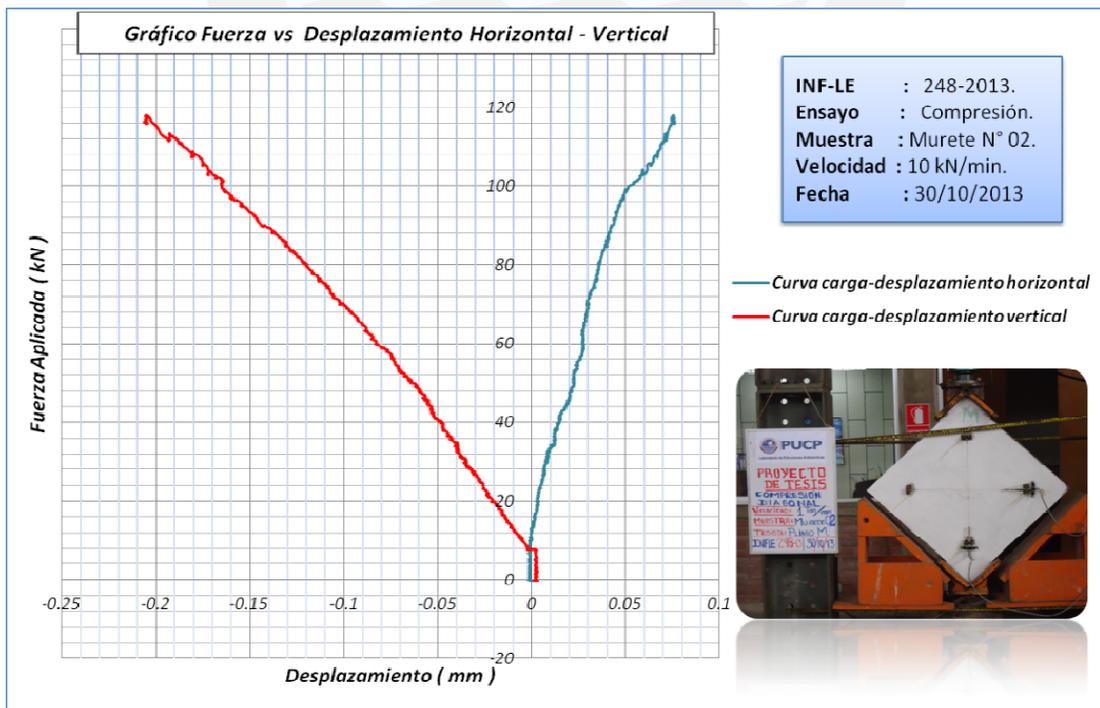


Fig. N° 26: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°02.

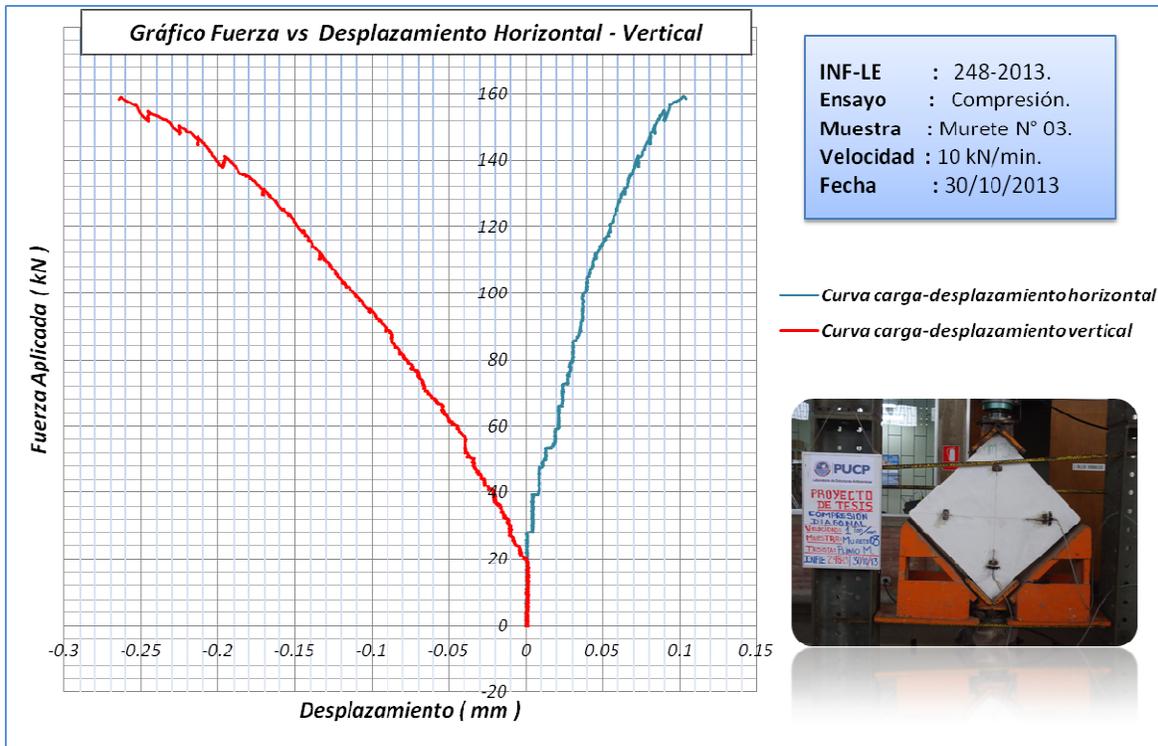


Fig. N° 27: Gráfico Fuerza vs. Desplazamiento Horizontal - Vertical del murete N°03.

Los cálculos para determinar el módulo de corte se muestran a continuación en la Tabla N°16.

Tabla N° 16: Cálculo del Módulo de Corte de muretes de albañilería tubular.

Espécimen	Distancia Horizontal	Distancia Vertical	Área	$\Delta P/\Delta D$ ver	$\Delta P/\Delta D$ hor	$G = \Delta\tau/\Delta \gamma$	$G = \Delta\tau/\Delta \gamma$
	LVDT (mm)	LVDT (mm)					
Murete N°01	502.0	502.0	1364.5	609.6	744.5	1233.0	1.26E+04
Murete N°02	505.0	504.0	1383.1	475.1	1551.9	1326.0	1.35E+04
Murete N°03	499.0	507.0	1402.9	521.1	1085.5	1266.0	1.29E+04
						G prom (kgf/cm²)	1.30E+04
						Desviación (kgf/cm²)	0.05E+04

Por lo que el módulo de corte de los muretes de albañilería tubular reforzada (**Gm**) fue **13 000 kgf/cm²**.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS TEÓRICO Y DISEÑO DE LOS MUROS A ESCALA NATURAL

Para efectos de diseñar los elementos de confinamiento de los muros a escala natural, se emplearon las resistencias características de la albañilería tubular reforzada con malla electrosoldada realizados en los ensayos de compresión de pilas y muretes así como los módulos elásticos.

$$f'm = 27 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (Resistencia a compresión de pilas)}$$

$$v'm = 9 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (Resistencia a compresión diagonal muretes)}$$

$$E m = 59\,500 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (Módulo de elasticidad)}$$

$$G m = 13\,000 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (Módulo de corte)}$$

4.1. Diseño de los muros

Los muros fueron diseñados a la rotura, asumiendo que el muro se comporta elásticamente ante sismos leves.

4.1.1. Diseño de los elementos de confinamiento

Para el diseño de los confinamientos de los muros MR-01 y MR-02, se emplearon las expresiones de la Norma Técnica E.070, evaluado mediante la siguiente fórmula que expresa la resistencia en el agrietamiento diagonal del muro:

$$V_m = 0.5 \cdot v'm \cdot \alpha \cdot t \cdot L + 0.23 \cdot P_g$$

Donde:

V_m : Resistencia teórica al agrietamiento diagonal.

$v'm$: Resistencia a corte diagonal de los muretes = 9 kgf/cm².

t : Espesor total del muro incluyendo el tarrajeo = 16 cm.

L : Longitud total del muro, incluyendo el peralte de las columnas = 260 cm.

α : Factor de reducción por efecto de la esbeltez = 1.

Pg : Carga gravitacional de servicio (MR-01; Pg = 11 tonf que da un esfuerzo axial de 2.65 kgf/cm² y para MR-02; Pg = 16 tonf para un esfuerzo de 3.85 kgf/cm²).

Sustituyendo en la fórmula tenemos los siguientes valores mostrados en la Tabla N°17.

Tabla N° 17: Carga teórica en la que alcanza el agrietamiento diagonal.

Muro	Carga Vertical	Vm
	(Tonf)	(Tonf)
MR-01	11.0	21.30
MR-02	16.0	22.40

◆ **Diseño de las vigas soleras**

La viga solera se diseño para soporta una tracción de T= 0.50 Vm = 11.20 tonf.

El refuerzo longitudinal viene expresado como:

$$A_s = \frac{T}{\phi \cdot f_y}$$

$$A_s = \frac{11.2\text{tonf}}{(0.90) \cdot 4280 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 2.9 \text{ cm}^2$$

Por lo que se colocó 4ø3/8” (As=2.9 cm²) como refuerzo longitudinal. Los estribos para las vigas soleras fueron los siguientes: acero de 6 mm de diámetro, 1 @ 0.05 m, 5 @ 0.10 m, resto @ 0.15 m de cada extremo.

Para evitar fallas locales en la zona de aplicación de carga por medio del actuador estructural, se colocó dos ganchos de acero (ø1/2”) en cada extremo.

◆ **Diseño de las columnas de confinamiento**

Las columnas son elementos que cumplen la función de absorber la carga en su totalidad cuando ocurre el agrietamiento diagonal. Su función principal es incrementar la ductilidad de los muros. En el diseño de las columnas se desprecia

el momento flector y solo se diseña para fuerzas axiales de tracción y compresión.

Cálculo de las fuerzas internas:

Altura del muro hacia el eje de aplicación de carga:

$$h = 2.30 \text{ m}$$

Resistencia al agrietamiento diagonal para los muros MR-01 y MR-02:

$$V_{m1} = 21.3 \text{ tonf} \quad V_{m2} = 22.4 \text{ tonf}$$

Resistencia a compresión del concreto:

$$f'_c = 190 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de los momentos de diseño para los muros MR-01 y MR-02 respectivamente:

$$M_{u1} = V_{m1} \cdot h = 48.99 \text{ tonf} \cdot \text{m} \quad M_{u2} = V_{m2} \cdot h = 51.52 \text{ tonf} \cdot \text{m}$$

Longitud del muro y número de columnas por paño:

$$L = 2.6 \text{ m}$$

$$L_m = L = 2.6 \text{ m} \quad N_c = 2$$

Fuerza axial en las columnas producidas por "M":

$$M = M_u - V_m \cdot \frac{h}{2}$$

$$F = \frac{M_u - V_m \cdot \frac{h}{2}}{L}$$

Para MR-01:

$$F_1 = \frac{M_{u1} - V_{m1} \cdot \frac{h}{2}}{L} = 9.42 \text{ tonf}$$

Para MR-02:

$$F_2 = \frac{M_{u2} - V_{m2} \cdot \frac{h}{2}}{L} = 9.91 \text{ tonf}$$

Las fuerzas cortantes (V_c) están expresados según la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{1.5 \cdot V_m \cdot L_m}{L \cdot (N_c + 1)}$$

Para MR-01:

$$V_{c1} = \frac{1.5 \cdot V_{m1} \cdot L_m}{L \cdot (N_c + 1)} = 10.65 \text{ tonf}$$

Para MR-02:

$$V_{c2} = \frac{1.5 \cdot V_{m2} \cdot L_m}{L \cdot (N_c + 1)} = 11.2 \text{ tonf}$$

Carga axial en las columnas producidas por la carga vertical (P_{ver}):

Para MR-01:

$$P_{c1} = \frac{11 \text{ tonf}}{N_c} = 5.5 \text{ tonf}$$

Para MR-02:

$$P_{c2} = \frac{16 \text{ tonf}}{N_c} = 8 \text{ tonf}$$

El valor de P_t es nulo por no tener muros transversales:

$$P_t = 0 \text{ tonf}$$

Fuerzas internas de tracción en las columnas de confinamiento:

Para MR-01:

$$T_1 = F_1 - P_{c1} - P_t = 3.9 \text{ tonf}$$

Para MR-02:

$$T_2 = F_2 - P_{c2} - P_t = 1.9 \text{ tonf}$$

Fuerzas internas de compresión en las columnas de confinamiento:

Para MR-01:

$$C_1 = P_{c1} + F_1 = 14.9 \text{ tonf}$$

Para MR-02:

$$C_2 = P_{c2} + F_2 = 17.9 \text{ tonf}$$

Diseño por compresión:

Área del núcleo confinado:

$$A_n = A_s + \frac{\frac{C}{\phi} - A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot \delta \cdot f'_c}$$

Para estribos cerrados:

$$\phi = 0.70$$

Para MR-01:

$$A_{n1} = A_s + \frac{\frac{C_1}{\phi} - A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot \delta \cdot f'_c} = 1.779 \text{ cm}^2$$

Para columnas sin muros transversales:

$$\delta = 0.8$$

Para MR-02:

$$A_{n2} = A_s + \frac{\frac{C_2}{\phi} - A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot \delta \cdot f'_c} = 34.801 \text{ cm}^2$$

Área del núcleo confinado colocado: 8 cm x 15 cm = 120 cm².**Diseño por corte por fricción:**

$$A_{cf} = \frac{V_c}{0.20 \cdot f'_c \cdot \phi}$$

$$\phi = 0.85$$

Para MR-01:

$$A_{cf1} = \frac{V_{c1}}{0.20 \cdot f'_c \cdot \phi} = 330 \text{ cm}^2$$

Para MR-02:

$$A_{cf2} = \frac{V_{c2}}{0.20 \cdot f'_c \cdot \phi} = 347 \text{ cm}^2$$

Área de la sección de concreto (Ac): 13cm x 20 cm = 260 cm².

Determinación del refuerzo vertical:

Refuerzo longitudinal

$$A_s = A_{sf} + A_{st} \geq \frac{0.10f'_c \cdot A_c}{f_y} \quad (\text{Mínimo: } 4 \text{ } \emptyset 8 \text{ mm})$$

Donde:

Refuerzo requerido por corte por fricción: Refuerzo requerido por tracción:

$$A_{sf} = \frac{V_c}{f_y \cdot \mu \cdot \phi} \quad A_{st} = \frac{T}{f_y \cdot \phi}$$

Para MR-01:

$$A_{sf1} = \frac{V_{c1}}{f_y \cdot \mu \cdot \phi} = 2.927 \text{ cm}^2 \quad A_{st1} = \frac{T_1}{f_y \cdot \phi} = 1.078 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 4 \text{ cm}^2$$

Acero colocado: $4 \text{ } \emptyset 1/2'' = 5.08 \text{ cm}^2$.

Para MR-02:

$$A_{sf2} = \frac{V_{c2}}{f_y \cdot \mu \cdot \phi} = 3.079 \text{ cm}^2 \quad A_{st2} = \frac{T_2}{f_y \cdot \phi} = 0.524 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 3.6 \text{ cm}^2$$

Acero colocado: $4 \text{ } \emptyset 1/2'' = 5.08 \text{ cm}^2$.

El estribaje empleado para las columnas fue el siguiente: acero de 6 mm de diámetro, 1 @ 0.05 m, 4 @ 0.10 m, resto @ 0.20 m de cada extremo. Por las

dimensiones reducidas de la columna se optó por estribos de $1 \frac{3}{4}$ de vuelta para evitar así las cangrejeras en el momento de la colocación del concreto.

4.1.2. Diseño del reforzamiento con malla electrosoldada

Para el diseño de la malla electrosoldada en MR-01 y MR-02 se asumió que el refuerzo de acero deberá absorber la carga producida por el agrietamiento diagonal de la albañilería.

Por lo que tenemos la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V_m \cdot S_{\text{cocada}}}{f_y \cdot L}$$

Cocada de la malla

$$S_{\text{cocada}} = 15 \text{ cm}$$

Para MR-01:

$$A_{s_{\text{requeridoMR01}}} = \frac{V_{m1} \cdot S_{\text{cocada}}}{f_y \cdot L} = 0.287 \text{ cm}^2$$

Para MR-02:

$$A_{s_{\text{requeridoMR02}}} = \frac{V_{m2} \cdot S_{\text{cocada}}}{f_y \cdot L} = 0.302 \text{ cm}^2$$

Área de acero colocado $\varnothing 6$ mm en dos lados del muro:

$$A_{s_{\text{colocado}}} = 2 \frac{\pi \cdot (6 \text{ mm})^2}{4} = 0.565 \text{ cm}^2$$

Los resultados del diseño del muro con sus respectivos confinamientos y el tipo de malla empleado para el reforzamiento se muestran en las figuras N°28 y N°29.

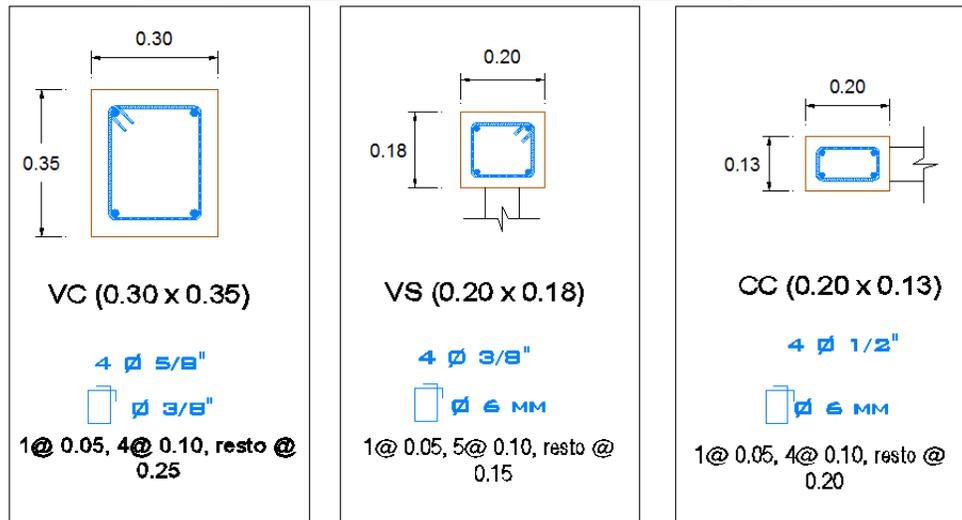
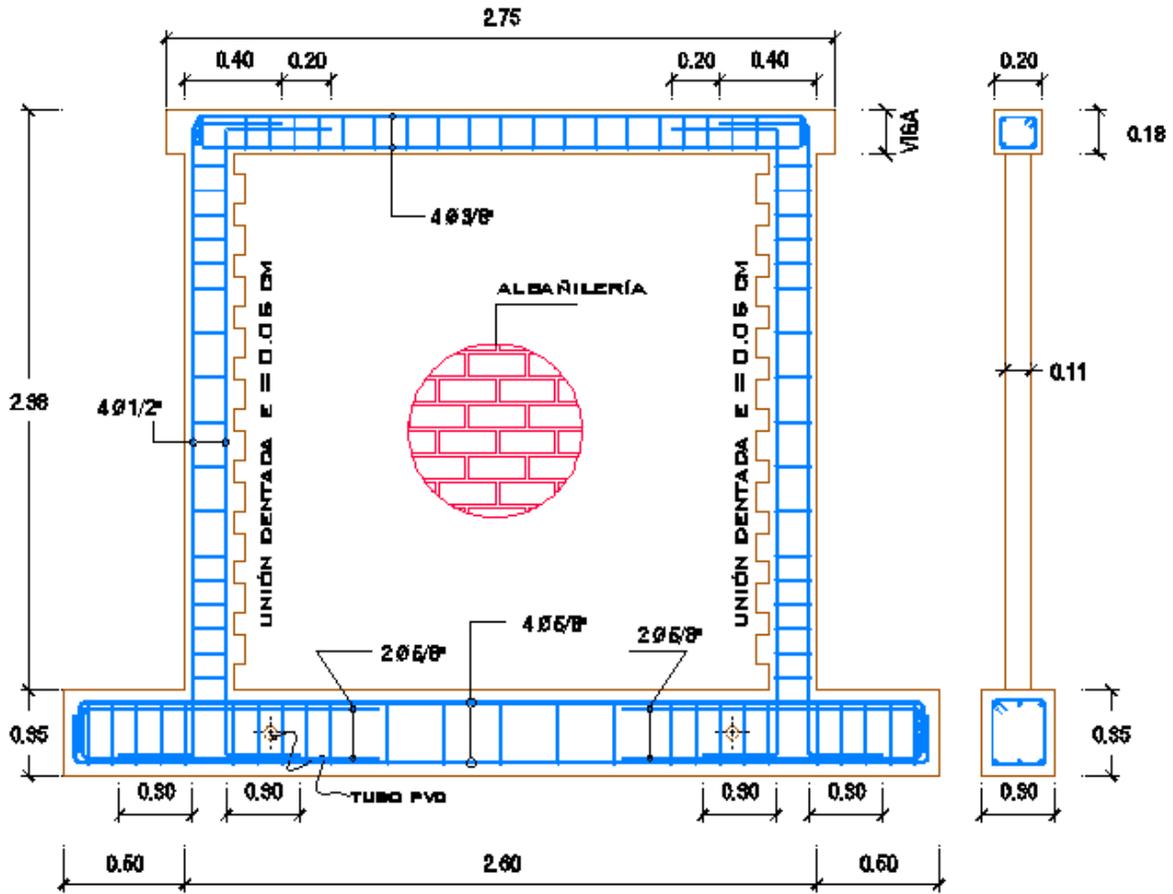


Fig. N° 28: Muro de albañilería y detalles de secciones de concreto para los confinamientos.

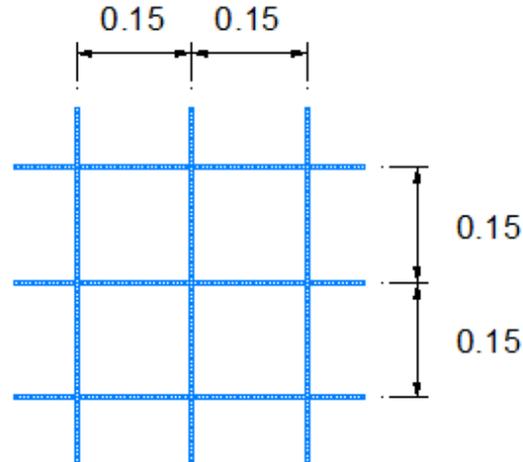


Fig. N° 29: Detalle de la malla electrosoldada acero \varnothing 6mm, cocada 15 cm.

4.2. Sección transformada

Según la Norma Técnica de albañilería E.070, para determinar las propiedades de un muro, como por ejemplo el momento de inercia se deberá aplicar el criterio de sección transformada (Fig. N°30), que implica convertir los elementos de concreto tales como las columnas a elementos equivalentes de albañilería a través de la relación entre sus módulos de elasticidad (n).

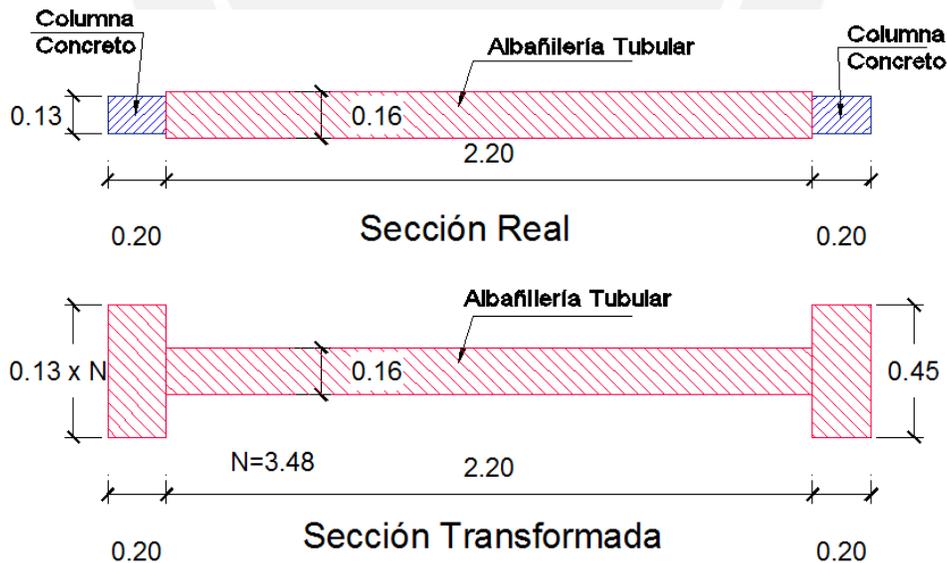


Fig. N° 30: Transformación de la sección de concreto a albañilería.

El cálculo de la sección transformada es como sigue a continuación:

$$f'c = 190 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$E_c = 15000 \cdot \sqrt{f'c}$$

$$E_c = 206761 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$E_m = 59500 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$n = \frac{E_c}{E_m} = 3.475$$

$$b = 13\text{cm} \cdot (n) = 45\text{cm}$$

Por lo que el momento de inercia de la sección equivalente es:

$$I_{\text{equi}} = \frac{0.16\text{m} \cdot (2.2\text{m})^3}{12} + 2 \left[\frac{0.452\text{m} \cdot (0.2\text{m})^3}{12} + 0.452\text{m} \cdot 0.20\text{m} \cdot (1.3\text{m} - 0.1\text{m})^2 \right]$$

$$I_{\text{equi}} = 40292800 \text{ cm}^4$$

4.3. Cálculo de la rigidez lateral

Para el cálculo de la rigidez lateral elástica (K) del muro se asume que se comporta como un elemento en voladizo y se utilizó la siguiente fórmula:

$$K = \frac{E_m}{\frac{h^3}{3 \cdot I_{\text{equi}}} + \left(f \cdot h \cdot \frac{E_m}{G_m \cdot A} \right)}$$

Donde:

K: Rigidez lateral.

E m: Módulo de elasticidad experimental = 59 500 kgf/cm².

G m: Módulo de corte experimental = 13 000 kgf/cm².

h: Altura del muro, desde la base hasta el eje de aplicación de la carga = 230 cm.

A: Área de la sección transversal del muro = 5 328 cm².

f: Factor de forma = A/Ac = 1.32

I equi: Momento de inercia (sección transversal transformada) = 40 292 800 cm⁴

Sustituyendo en la fórmula tenemos:

$$K = 16.5 \frac{\text{tonf}}{\text{mm}}$$

4.4. Fisuración en tracción por flexión

El esfuerzo de tracción resultante más crítico será la combinación del esfuerzo de flexión ocasionado por la carga lateral en conjunto con el esfuerzo de compresión generado por la carga vertical aplicada, como se muestra a continuación:

$$\sigma_{\text{tracción}} = \frac{M \cdot y}{I_{\text{equi}}} - \frac{P_{\text{ver}}}{A} \qquad \sigma_{\text{tracción}} = \frac{f't}{n} = \frac{2 \cdot \sqrt{f'c}}{n}$$

Por lo que la capacidad de carga para la tracción máxima en el concreto es expresada como:

$$F = \frac{\left(\frac{2 \cdot \sqrt{f'c}}{n} + \frac{P_{\text{ver}}}{A} \right) \cdot I_{\text{equi}}}{h \cdot y}$$

Donde:

$\sigma_{\text{tracción}}$: Esfuerzo de tracción máximo.

F: Capacidad de tracción del concreto (Fuerza asociada a la aparición de la primera fisura).

n: $E_c / E_m = 3.475$.

y : Distancia al centroide de la fibra mas traccionada = 130 cm.

M : Momento debido a la fuerza horizontal = F x h.

f't: Resistencia a tracción por flexión del concreto.

Pver: Carga vertical (MR-01; Pver = 11 tonf, MR-02; Pver = 16 tonf).

A: Área de la sección transversal del muro = 5 328 cm².

Sustituyendo para los dos estados de carga vertical aplicados se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla N°18.

Tabla N° 18: Fuerza cuando se presenta la primera fisura (tracción en el concreto).

Muro	Carga Vertical	F
	(Tonf)	(Tonf)
MR-01	11.0	13.50
MR-02	16.0	14.70

4.5. Resistencia asociada a la falla por flexión

La resistencia (V_f) asociada a la fluencia del refuerzo vertical existente en la base de la columna en tracción se calculó con la siguiente expresión:

$$V_f = \frac{A_s \cdot f_y \cdot d}{h}$$

Donde:

V_f : fuerza cortante asociada a la fluencia del refuerzo vertical.

h : Altura del muro, desde la base hasta el eje de aplicación de la carga= 230 cm.

A_s : Área del refuerzo vertical en el extremo del muro ($4\phi 1/2''$) = 5.08 cm².

f_y : Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo = 4 280 kgf/cm².

d : Peralte efectivo del muro = 0.80 L.

Por lo que la fuerza cortante resultó:

$$V_f = 19.7 \text{ tonf.}$$

4.6. Tipo de Falla esperado en MR-01 y MR-02

Por lo que las resistencias a corte ($V_m = 21.30$ tonf en MR-01 y $V_m = 22.40$ tonf en MR-02) son mayores que la resistencia a flexión ($V_f = 19.7$ tonf) se puede afirmar que la falla esperada será por flexión, para lo cual ya deberá haber ocurrido la aparición de la primera fisura por flexión en las columnas ($F = 13.50$ tonf en MR-01 y $F = 14.70$ tonf en MR-02).

CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE ALBAÑILERÍA REFORZADOS

Para poder analizar la efectividad del reforzamiento con malla electrosoldada de los muros de albañilería tubular y con el objetivo de mejorar el comportamiento estructural, se construyeron dos muros (MR-01 y MR-02) a escala natural con las mismas características.

5.1. Características de los muros MR-01 y MR-02

Los muros presentaron las siguientes características:

Muros MR-01 y MR-02:

- ✓ Muro portante de albañilería confinada con ladrillo tubular (ladrillo pandereta rayado).
- ✓ Dimensiones de la albañilería: 2.20 m de largo, 2.20 m de alto y 0.11 m de espesor.
- ✓ El aparejo empleado de las unidades de albañilería fue de tipo sogá, con traslape entre hiladas de medio ladrillo.
- ✓ La conexión columna-albañilería fue del tipo dentada con 5 cm de penetración del concreto de la columna.
- ✓ Las juntas horizontales y verticales fueron de 1.5 cm de espesor.
- ✓ Se utilizó malla electrosoldada (\varnothing 6mm) y 15 cm de cocada, sujeta con alambre #8 cada 45 cm en ambas caras de la albañilería.
- ✓ La proporción del mortero empleado para las juntas y el tarrajeo fue de 1:4 (cemento:arena).
- ✓ Las unidades de albañilería fueron tratadas con agua durante 30 minutos 12 horas antes de asentarlos.
- ✓ Los refuerzos de los confinamientos y viga de cimentación fueron los descritos en capítulo 4 acápite 4.1.
- ✓ El espesor del tarrajeo empleado fue de 2.5 cm en ambos lados del muro.
- ✓ La resistencia de diseño empleado para el concreto fue 175 kgf/cm².

- ✓ La preparación del concreto fue con una mezcladora de concreto y la colocación en los confinamientos fue con el empleo de vibradora.

5.2. Construcción de la viga de cimentación

La sección de la viga fue 30 cm x 35 cm y 3.60 m de largo. La resistencia de diseño del concreto fue de 210 kgf/cm².

Para su construcción primero se habilitó el acero de refuerzo y luego se procedió a encofrar (Fig. N°31), antes se colocó los anclajes del refuerzo vertical de las columnas, además se colocó pases de tubo de pvc para su izaje y traslado.

Posteriormente se procedió a realizar la colocación del concreto empleando la mezcladora y la vibradora (Fig. N°31), luego de 4 horas se rayó la superficie donde se asentó el muro de albañilería.

Al día siguiente del vaciado se realizó el desencofrado para curar la viga, el curado fue por 7 días y con una frecuencia de tres veces por día.

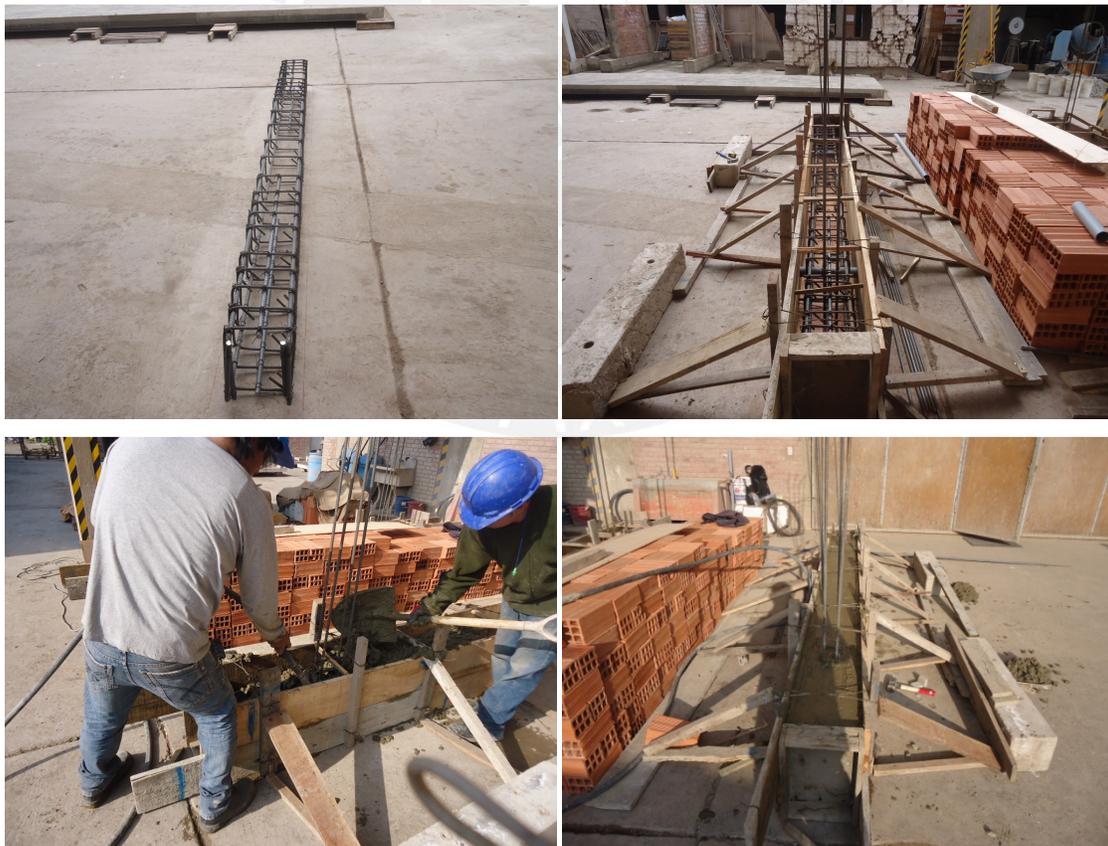


Fig. N° 31: habilitación de acero, encofrado y vaciado de la viga de cimentación.

5.3. Construcción de la Albañilería

Para la construcción de los muros de albañilería (Fig. N°32), primero se procedió a realizar la limpieza de partículas sueltas y demás materiales sobre la superficie de asiento, luego se procedió a realizar el emplantillado de la primera hilada para poder asentar los ladrillos maestros, previamente se colocó con lechada de agua-cemento en la superficie rayada en la viga de cimentación.

La función de los ladrillos maestros en los extremos de la primera hilada del muro fue definir el alineamiento longitudinal del muro. La colocación de estos ladrillos fue con mucho cuidado, controlando la altura de cada hilada y se empleó la plomada para verificar el alineamiento vertical.

Se empleó mortero con proporción cemento-arena (1:4) para las juntas y la cantidad de agua fue agregada de acuerdo a la trabajabilidad, al tacto y criterio del albañil. El asentado del muro completo con las unidades de albañilería fue realizado en dos jornadas de trabajo y con una altura máxima de 1.30 m por jornada, además se dejó en la última hilada libre la junta vertical para su realización en la jornada siguiente.



Fig. N° 32: Construcción de los muros de albañilería.

5.4. Columnas de confinamiento

La sección de la columna fue 13 cm x 20 cm y 2.20 m de alto. La resistencia de diseño del concreto fue 175 kgf/cm².

Al día siguiente del asentado de los muros de albañilería, se relleno con papel los alveolos de la unidad para evitar la infiltración de la lechada proveniente del concreto en la conexión dentada durante el vaciado. Luego se procedió a culminar la colocación de los estribos faltantes según el diseño respectivo.

Se procedió realizar el encofrado de las columnas, verificando su verticalidad con una plomada y se taponeo las aberturas pequeñas con papel para garantizar su hermeticidad. Luego se procedió a vaciar las columnas, realizando el compactado y vibrado respectivo para evitar la posible aparición de cangrejas, se realizó el vaciado en capas de 50 cm, teniendo cuidado de no impactar la conexión dentada de la albañilería. El desencofrado fue realizado al día siguiente del vaciado y fue curado por 7 días. Cabe resaltar que no se produjeron cangrejas en las columnas. El encofrado y vaciado de las columnas se realizó en una jornada de trabajo (Fig. N°33).



Fig. N° 33: Encofrado, vaciado y desencofrado de las columnas.

5.5. Vigas Soleras de confinamiento

La sección de la viga fue 20 cm x 18 cm y 2.75 m de largo. La resistencia de diseño del concreto fue 175 kgf/cm².

Una vez realizado el desencofrado de las columnas se procedió a colocar la armadura de la viga solera, además se colocó los ganchos adicionales (\varnothing 1/2") en los extremos donde se aplicaron la fuerza lateral (evita las fallas locales). Luego se realizó el encofrado de la viga verificando siempre su verticalidad y hermeticidad.

Posteriormente se realizó el vaciado y compactado del concreto con la vibradora. Finalmente se desencofró las vigas y se realizó el curado por 7 días. La construcción de las vigas se muestra en la Fig. N°34.



Fig. N° 34: Colocación de acero, encofrado, vaciado y desencofrado de las vigas.

5.6. Colocación de la malla electrosoldada

La malla fue de \varnothing 6mm y con cocada de 15 cm con una resistencia a la fluencia de 5 000 kgf/cm².

Se colocaron mallas en las dos caras (Fig. N°35), las cuales fueron interconectadas con alambre #8 doblado a 90°, que atravesó el muro mediante

perforaciones realizados con una varilla de acero de 1/4" y un martillo. La interconexión de la malla fue realizada a cada 45 cm en los nudos y fue sujeta con alambre #16 (Fig. N°36).

La malla fue conectada con las columnas para garantizar la continuidad, fue traslapada 20 cm y sujeta en el perímetro extremo de las columnas. Posteriormente se procedió a taponear las perforaciones con una lechada de mortero con una relación volumétrica cemento-arena (1:3).

Finalmente se procedió a tarrajear el muro junto con las columnas (Fig. N°37 y Fig. N°38) con un mortero cemento-arena (1:4) y un espesor de 2.5 cm.



Fig. N° 35: Colocación de la malla en los muros.



Fig. N° 36: Interconexión de malla a través del muro con alambre #8 cada 45 cm.



Fig. N° 37: Tarrajeo de los muros con mortero cemento-arena fina (1:4).



Fig. N° 38: Tarrajeo de columnas.

Cabe resaltar que las mallas solo cubrieron la albañilería y las columnas de confinamiento y no se conectaron a la viga solera ni a la viga de cimentación, esto se realizó para ver cuál es el efecto producido en las columnas al conectar todo con malla y tarrajar en todo su perímetro.

CAPÍTULO 6: ENSAYO DE LOS MUROS DE ALBAÑILERÍA REFORZADOS

Con la finalidad de simular el efecto sísmico que actúa sobre los muros de albañilería MR-01 y MR-02 contruidos con ladrillo pandereta, ambos muros se sometieron a un ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado y además la acción de una carga vertical ($P_{ver} = 11$ tonf para MR-01 y $P_{ver} = 16$ tonf para MR-02). Los objetivos de este ensayo realizado fueron determinar los valores experimentales de:

- Diagramas histeréticos Fuerza Cortante – Desplazamiento Lateral.
- Envolvente Fuerza Cortante – Desplazamiento Lateral.
- Rigidez lateral.
- Capacidad de carga máxima.
- Módulo de elasticidad y módulo de corte de la albañilería.

6.1. Montaje e instrumentación

A la edad de 28 días (culminada la construcción de los muros), se dispuso el traslado de los muros con el puente grúa hacia la ubicación específica en el laboratorio para la ejecución de los ensayos.

Para el ensayo se colocaron 10 LVDT's para cada muro (Fig. N°39), cada LVDT cumplió la función de registrar un desplazamiento como se describe a continuación:

- D1 : Desplazamiento lateral superior (viga solera).
- D2 : Desplazamiento vertical en tramo central del muro.
- D3, D4 : Desplazamiento diagonales en la parte central del muro.
- D5, D6 : Desplazamiento vertical en los talones de la columna.
- D7, D8 : Desplazamiento horizontal en la conexión columna-albañilería.
- D9 : Desplazamiento horizontal relativo entre columnas.
- D10 : Desplazamiento del muro sobre la cimentación.

La instrumentación, todo el personal técnico y equipos para el ensayo fueron facilitados por el Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

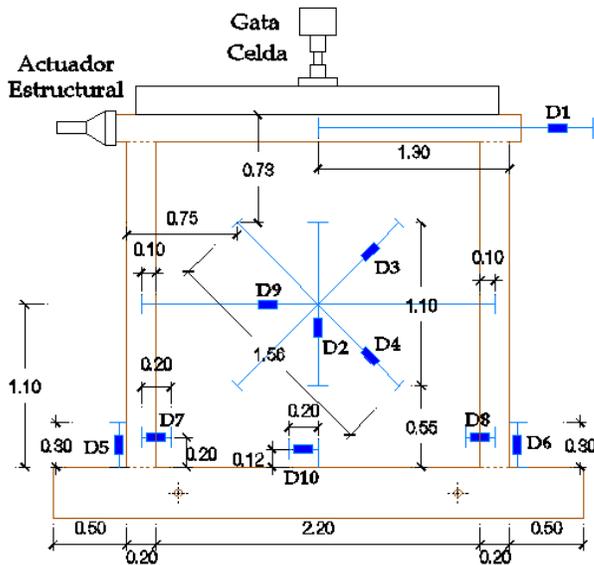


Fig. N° 39: Ubicación de los LVDT's en los muros MR-01 y MR-02.

Se utilizó un actuador dinámico estructural de 50 tonf de capacidad, que reaccionaba sobre un pórtico metálico para la aplicación de la carga cíclica horizontal y una gata con su respectiva celda para la aplicación de la carga vertical. La fijación de cada muro hacia la losa de ensayos fue mediante gatas hidráulicas, cargas verticales de 25 tonf en cada extremo de la viga de cimentación (función: evitar el volcamiento del muro), y una fuerza horizontal de 30 tonf en un extremo de la viga de cimentación (función: evitar el deslizamiento del muro) como se muestran a continuación en las figuras N°40 y N°41.

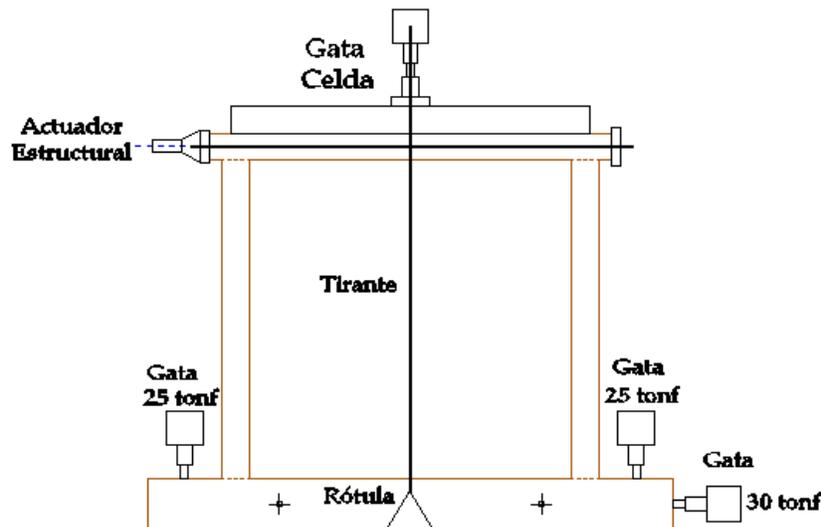


Fig. N° 40: Disposición de la aplicación de cargas de fijación para el ensayo.



Fig. N° 41: Preparación y equipamiento del muro para el ensayo.

6.2. Fases del ensayo

Para realizar un análisis detallado del comportamiento de los muros de albañilería MR-01 y MR-02, ante un desplazamiento lateral incremental (D1), se realizaron 6 fases (Tabla N° 19). El número de ciclos fue variable para cada fase, hasta estabilizar el lazo histerético Cortante-Desplazamiento D1 y al paso que se iban formando las grietas se fueron marcando con distintos colores según la fase como se indica en la Tabla N° 19.

Tabla N° 19: Características de las fases en el ensayo de carga cíclica.

Fase	1	2	3	4	5	6
N° de Ciclos	1	2	3	3	3	3
D1 (mm)	1.0	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0
Deriva	0.04%	0.11%	0.22%	0.43%	0.65%	0.87%
Color	Amarillo	Rosado	Morado	Café	Celeste	Verde

Al inicio del ensayo se aplicó una precarga lateral de 300 kgf para ajustar los tirantes de acero en el extremo opuesto del actuador estructural dinámico, realizado esto se dispuso a carga nula para colocar los sensores (LVDT's) en registro igual a cero. El ensayo se detuvo cada vez que surgió alguna grieta importante con el objeto de registrar el instante asociado.

6.3. Comportamiento de los muros

El comportamiento visualizado en los muros MR-01 y MR-02 fue similar con la variante de los niveles máximos de cargas alcanzados, obteniéndose fisuras de hasta 1.3 mm como máximo en la albañilería lo cual se debió fundamentalmente a la malla colocada en su superficie.

En los siguientes gráficos se muestra el comportamiento detallado para cada fase de los ensayos de los muros MR-01 y MR-02.

6.3.1. Muro MR-01

Fase 01 (Dmax=1 mm):

El muro en esta fase se comportó elásticamente, no aparecieron ningún tipo de fisuras en toda la superficie que se puedan apreciar (Fig. N°42).



Fig. N° 42: Comportamiento Elástico sin presencia de fisuras – Fase 01 (MR-01).

Fase 02 (Dmax=2.5 mm):

En esta fase se presentó la aparición de la primera fisura con una magnitud de 0.05 mm aproximadamente y a una carga de 17 tonf, la ubicación fue en la parte inferior de la columna izquierda. A medida que se continuaba el ensayo aparecieron fisuras en las partes medias bajas de las columnas izquierda y derecha (Fig. N° 43), con magnitudes de 0.05 mm lo cual se registro con la plantilla de medición de fisuras (Fig. N° 44).



Fig. N° 43: Fisuras horizontales en las columnas – Fase 02 (MR-01).

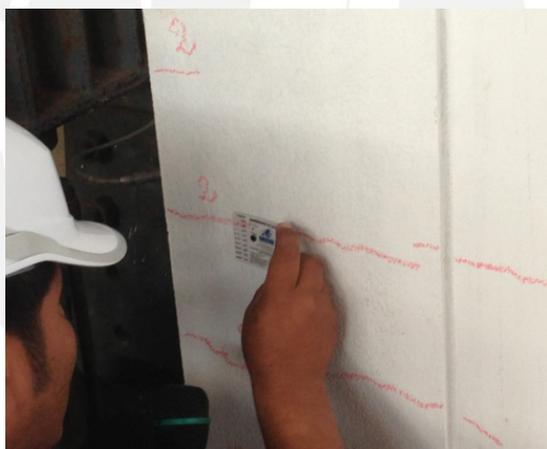


Fig. N° 44: Medición de magnitud de la fisura – Fase 02 (MR-01).

Fase 03 ($D_{max}=5$ mm):

En esta etapa del ensayo continuaron apareciendo fisuras en las columnas que se fueron extendiendo hacia arriba, además comenzaron a aparecer fisuras diagonales en la parte inferior del muro (Fig. N°45).



Fig. N° 45: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 03 (MR-01).

Fase 04 (Dmax=10 mm):

En este nivel del ensayo las fisuras se hicieron más notorias llegando hasta magnitudes de 0.5 mm, las fisuras diagonales fueron extendiéndose hacia la parte central del muro (Fig. N°46).



Fig. N° 46: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 04 (MR-01).

Fase 05 (Dmax=15 mm):

La carga máxima se presentó en esta fase, el valor registrado fue de 37.2 tonf. La extensión de la fisura partió desde la parte superior de la columna izquierda cruzando más de la mitad del muro (Fig. N°47), la dimensión de la fisura fue de 0.80 mm. Cabe resaltar que el tarrajeo en los talones de las columnas fue desprendiéndose al proseguir el ensayo.



Fig. N° 47: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 05 (MR-01).

Fase 06 (Dmax=20 mm):

En esta fase se produjo el desprendimiento del tarrajeo en los talones de las columnas y la posterior trituración de la columna (Fig. N° 48 y Fig. N°49), la falla en el muro fue por deslizamiento sobre la viga de cimentación (Fig. N° 50), haciendo que solo el muro se desplace en el resto de los ciclos de la fase. La falla en las columnas fue por corte por fricción y no se presentaron fisuras considerables en el muro.



Fig. N° 48: Trituración de columnas en los talones (vista panorámica) – Fase 06 (MR-01).



Fig. N° 49: Trituración de columnas en los talones – Fase 06 (MR-01).



Fig. N° 50: Falla por deslizamiento del muro sobre la viga de cimentación (Longitud=14mm) – Fase 06 (MR-01).

6.3.2. Muro MR-02

Fase 01 (Dmax=1 mm):

El muro en esta fase se comportó elásticamente, no se apreciaron fisuras perceptibles (Fig. N°51).



Fig. N° 51: Comportamiento Elástico sin presencia de fisuras – Fase 01 (MR-02).

Fase 02 (Dmax=2.5 mm):

Se presentó la aparición de la primera fisura por flexión en el talón de la columna izquierda (Fig. N°52) y para un nivel de carga de 18.5 tonf. La fisura llegó a medir 0.05 mm aproximadamente.



Fig. N° 52: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 02 (MR-02).

Fase 03 (Dmax=5 mm):

En esta etapa del ensayo continuaron apareciendo fisuras en las columnas que fueron extendiéndose hacia la parte superior, además comenzaron a aparecer fisuras diagonales en la parte inferior del muro (Fig. N° 53). Las fisuras llegaron a medir hasta 0.20 mm de grosor.



Fig. N° 53: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 03 (MR-02).

Fase 04 (Dmax=10 mm):

Las fisuras diagonales en esta fase fueron extendiéndose hacia la albañilería (Fig. N°54) alcanzando niveles de hasta 0.50 mm de grosor.



Fig. N° 54: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 04 (MR-02).

Fase 05 (Dmax=15 mm):

En esta fase se presentó la carga máxima lateral, cuyo valor registrado fue de 42.2 tonf. La fisura al igual que el muro MR-01 partió desde la parte superior de la columna izquierda (Zona de aplicación de carga a través del actuador dinámico), cruzando más de la mitad del muro (Fig. N°55), la dimensión máxima de la fisura para esta fase fue de 1.30 mm.



Fig. N° 55: Fisuras horizontales en las columnas y fisuras diagonales en la albañilería – Fase 05 (MR-02).

Fase 06 (Dmax=20 mm):

En este nivel del ensayo al igual que el muro MR-01 se presentó el desprendimiento del tarrajeo y la posterior trituración de las columnas en los talones (Fig. N° 56 y Fig. N° 57). Los niveles de carga no se incrementaron mas haciendo que el muro falle por deslizamiento sobre la viga de cimentación (Fig. N° 58).



Fig. N° 56: Talón de columna triturado.



Fig. N° 57: Trituración de columnas en los talones – Fase 06 (MR-02).

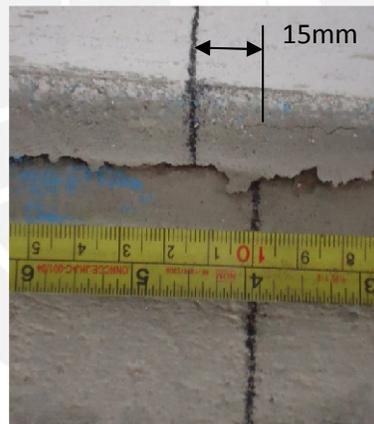


Fig. N° 58: Falla por deslizamiento del muro sobre la viga de cimentación (Longitud= 15 mm) – Fase 06 (MR-02).

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS, PROCESAMIENTO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se realizó el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos para los muros MR-01 y MR-02 en base a los desplazamientos registrados por los LVDT's y las fuerzas asociadas generadas por el actuador dinámico y la gata vertical. Al final se realizó la comparación con ensayos previos realizados utilizando reforzamiento con malla electrosoldada [Ref. 3].

La duración del ensayo por muro fue de 3 horas aproximadamente, se presenta a continuación la historia de desplazamientos aplicados con el respectivo color definido para cada fase obtenida de los ensayos (Fig. N° 59 y Fig. N° 60).

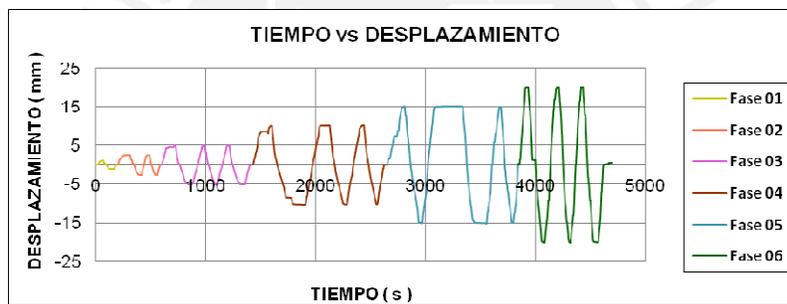


Fig. N° 59: Diagrama Tiempo vs. Desplazamiento del MR-01.

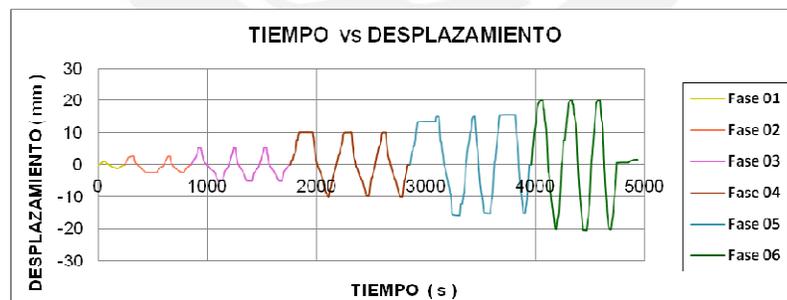


Fig. N° 60: Diagrama Tiempo vs. Desplazamiento del MR-02.

7.1. Diagramas Histeréticos Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral

En las figuras N°61 y N°62 se muestran los lazos histeréticos Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral (D1) correspondientes a los muros MR-01 y MR-02, respectivamente.

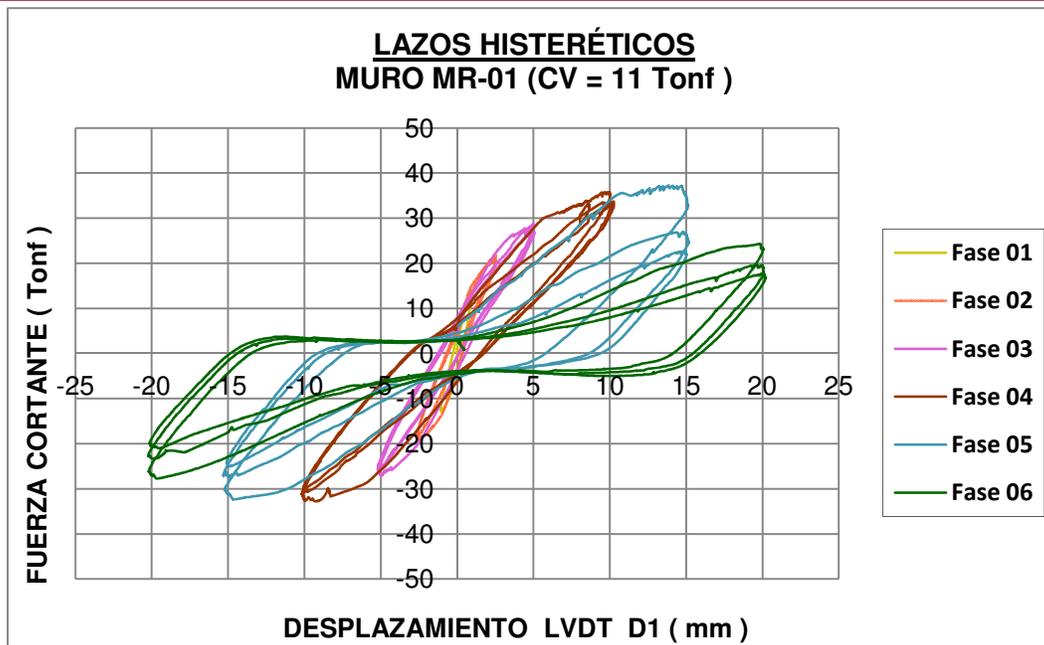


Fig. Nº 61: Diagrama de Lazos Histeréticos para el muro MR-01.

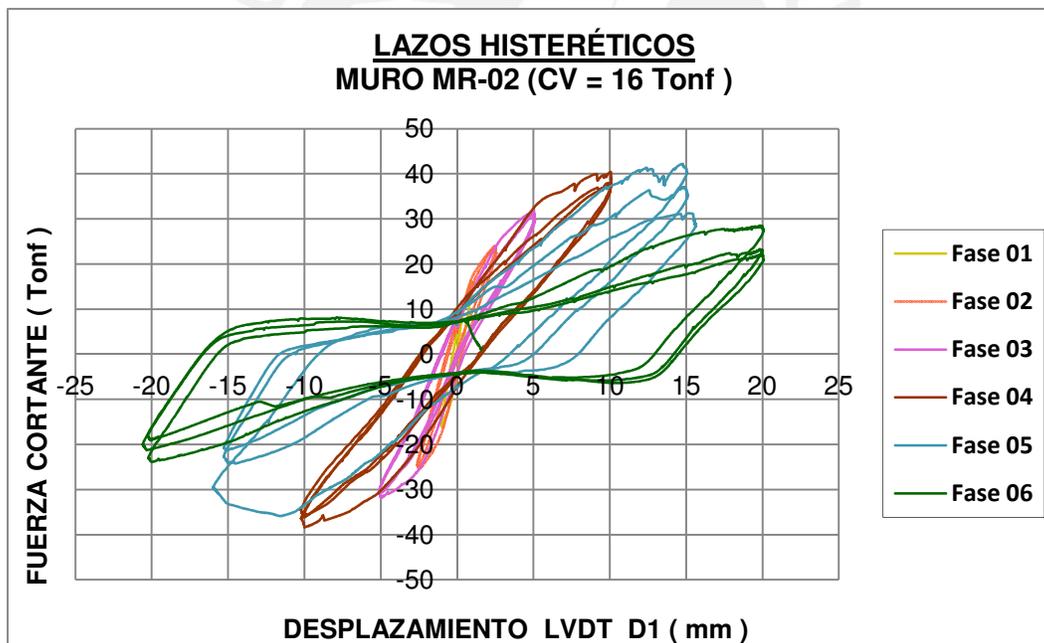


Fig. Nº 62: Diagrama de Lazos Histeréticos para el muro MR-02.

En estos diagramas se aprecia la degradación de la rigidez lateral, expresada en el cambio variante de la pendiente de los lazos histeréticos en cada fase. La pérdida de la capacidad de resistencia lateral se observa comparando el lazo asociado a la carga máxima y los posteriores lazos, donde la capacidad de carga disminuye a medida que el desplazamiento aumenta.

La forma de los lazos para los muros MR-01 y MR-02 es muy similar. En ambos muros se aprecia la caída brusca de la resistencia en $D1=15$ mm, producto de la falla por trituración de los talones de las columnas, justo después de haberse alcanzado la máxima resistencia en los muros.

7.2. Envoltente Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral

Para realizar la envoltente de lazos histéreticos, se seleccionaron los datos asociados a la mayor fuerza cortante (positiva y negativa) en cada fase. Los datos fueron registrados en las Tablas N°20 y N°21, para MR-01 y MR-02 respectivamente. La caída en resistencia entre las fases 5 y 6 es de 35% y 32% para ambos muros, que si bien son valores altos, se dan después de la deriva máxima de la Norma. Las envoltentes se muestran en la Fig. N° 63.

Tabla N° 20: Puntos máximos asociados a la fuerza cortante (V) en cada fase para el muro MR-01.

MR-01	V (Tonf)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D9 (mm)	Pver (Tonf)
FASE 01	13.67	0.996	0.003	-0.080	0.203	0.021	11.61
	-12.94	-0.999	-0.007	0.127	-0.022	0.022	11.61
FASE 02	21.04	2.465	-0.007	-0.142	0.265	0.017	11.89
	-19.13	-2.487	-0.039	0.170	-0.106	0.038	11.74
FASE 03	27.55	4.951	0.006	-0.235	0.375	0.005	12.04
	-27.11	-4.948	-0.059	0.228	-0.171	0.052	11.81
FASE 04	35.67	9.990	-0.026	-0.482	0.497	-0.259	11.84
	-32.65	-9.984	-0.162	0.349	-0.619	-0.350	11.28
FASE 05	37.23	13.841	-0.179	-0.768	0.549	-0.553	13.25
	-32.36	-14.623	-0.162	0.418	-0.652	-0.393	12.23
FASE 06	24.28	19.767	-0.134	-0.588	0.441	-0.403	11.44
	-27.76	-19.643	-0.109	0.404	-0.546	-0.348	11.95

Tabla Nº 21: Puntos máximos asociados a la fuerza cortante (V) en cada fase para el muro MR-02.

MR-02	V (Tonf)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D9 (mm)	Pver (Tonf)
FASE 01	15.98	0.980	-0.006	-0.078	0.198	0.022	16.68
	-16.07	-0.990	-0.006	0.161	-0.065	0.021	16.52
FASE 02	23.40	2.507	-0.043	-0.179	0.240	0.021	16.46
	-25.56	-2.469	-0.033	0.262	-0.160	0.022	16.91
FASE 03	31.32	4.981	-0.041	-0.241	0.350	0.022	16.65
	-31.87	-4.946	-0.029	0.324	-0.306	0.020	17.16
FASE 04	40.46	10.058	-0.069	-0.510	0.462	-0.128	17.37
	-38.38	-9.990	-0.044	0.423	-0.651	-0.276	18.42
FASE 05	42.15	14.798	-0.478	-1.305	0.706	-0.802	18.06
	-35.79	-11.706	-0.087	0.360	-0.744	-0.450	16.35
FASE 06	28.52	19.833	-0.386	-1.069	0.562	-0.739	16.38
	-23.88	-19.989	-0.064	0.267	-0.576	-0.357	16.95

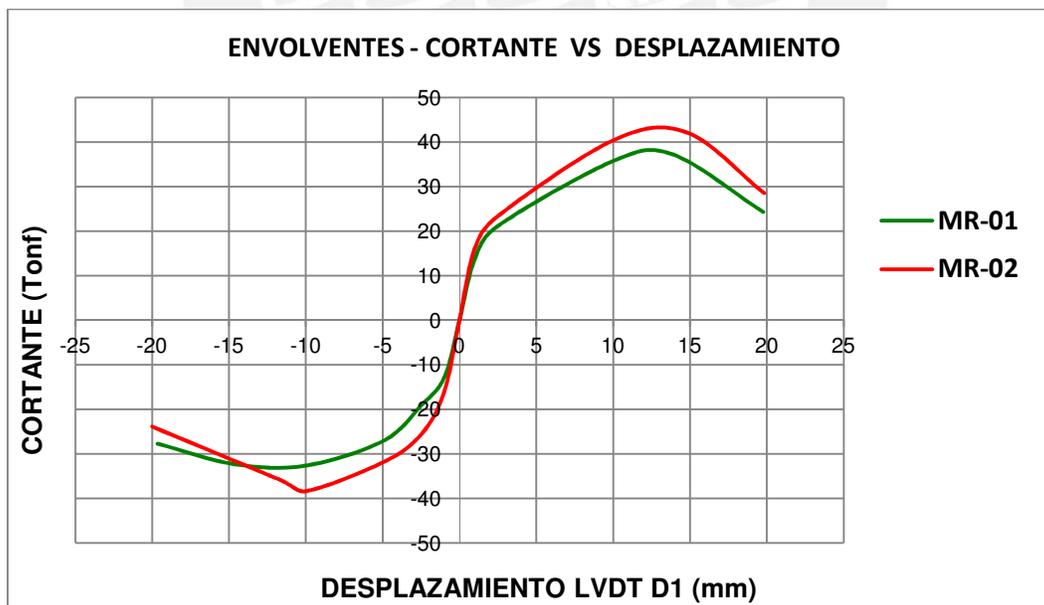


Fig. Nº 63: Valores Máximos de Fuerza Cortante vs Desplazamiento.

En la Fig. N° 63 se puede apreciar una mejora en la resistencia del muro MR-02 sobre el muro MR-01, teniendo ambos las mismas características con la diferencia solo en la carga vertical aplicada. Esto se puede reflejar de manera similar en los esfuerzos que se determinaron en la Fig. N° 64, alcanzándose valores máximos de 8.9 kgf/cm² para el muro MR-01 y 10.13 kgf/cm² para el muro MR-02.

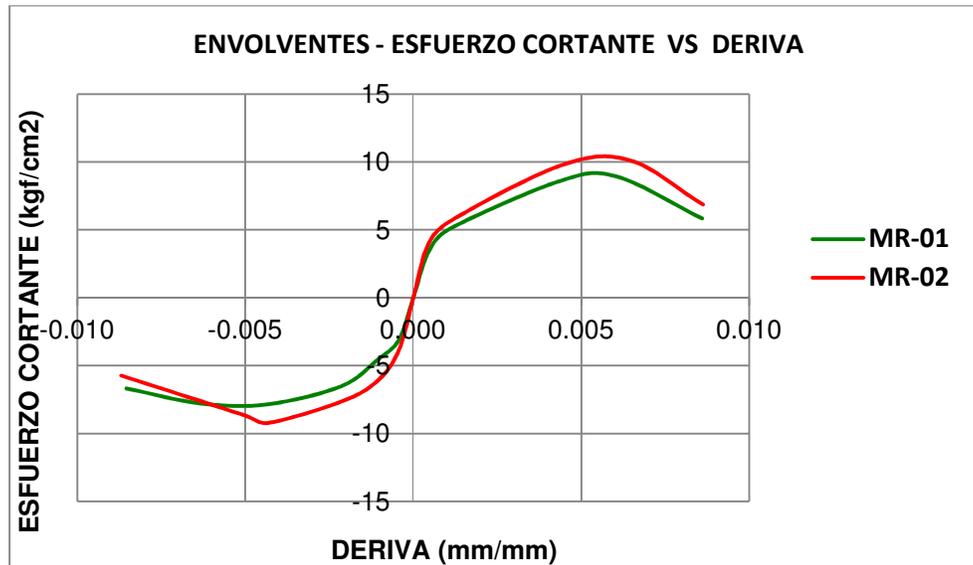


Fig. N° 64: Valores Máximos de Esfuerzo Cortante vs Deriva.

7.3. Desplazamiento lateral permisible

La Norma E.030 indica que para los muros de albañilería confinada se debe considerar una máxima deriva de 0.005. Para nuestro caso específico, en ambos muros a esta deriva le corresponde un desplazamiento lateral expresado por: $\Delta = 0.005 \times h$, donde "h" es la altura del muro, en consecuencia $\Delta = 0.005 \times 2380 \text{ mm} = 11.90 \text{ mm}$. En la fase 05 se pudo observar que en el primer ciclo se alcanzó este desplazamiento, y que luego llegó hasta un desplazamiento de 15 mm.

Para el caso de ambos muros MR-01 y MR-02, la degradación de la resistencia se llegó a dar en derivas mayores a la reglamentaria, manteniéndose con incremento de resistencia hasta derivas algo mayores que 0.005.

7.4. Rigidez lateral inicial

Previamente a la aparición de la primera fisura de tracción por flexión en la base de la columna, se determinó su rigidez lateral en el rango elástico, para lo cual se empleó los datos de lazo histerético de la fase 01 (Fig. N° 65 y Fig. N° 66).

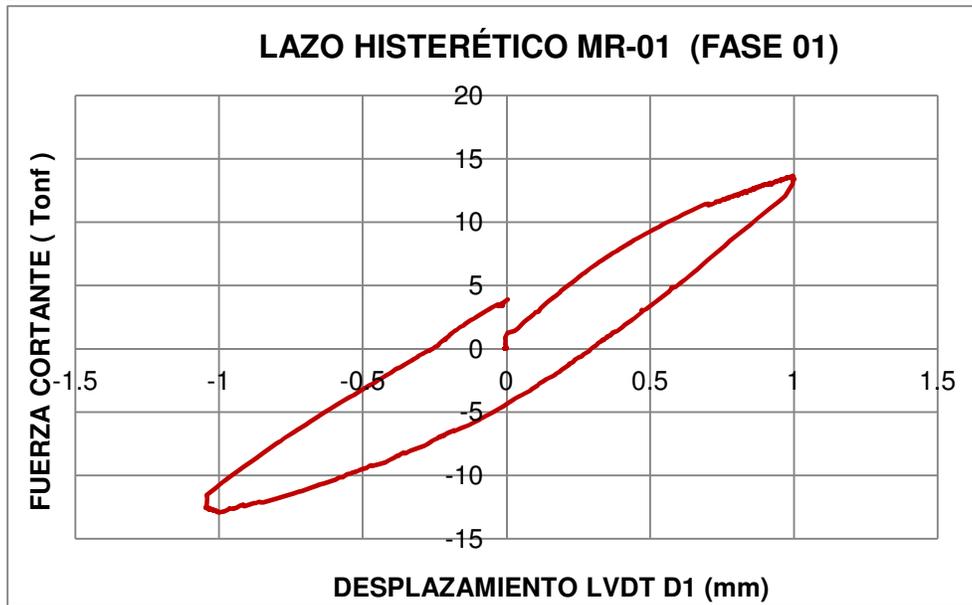


Fig. N° 65: Lazo Histerético Fase 01, muro MR-01 (Rango Elástico).

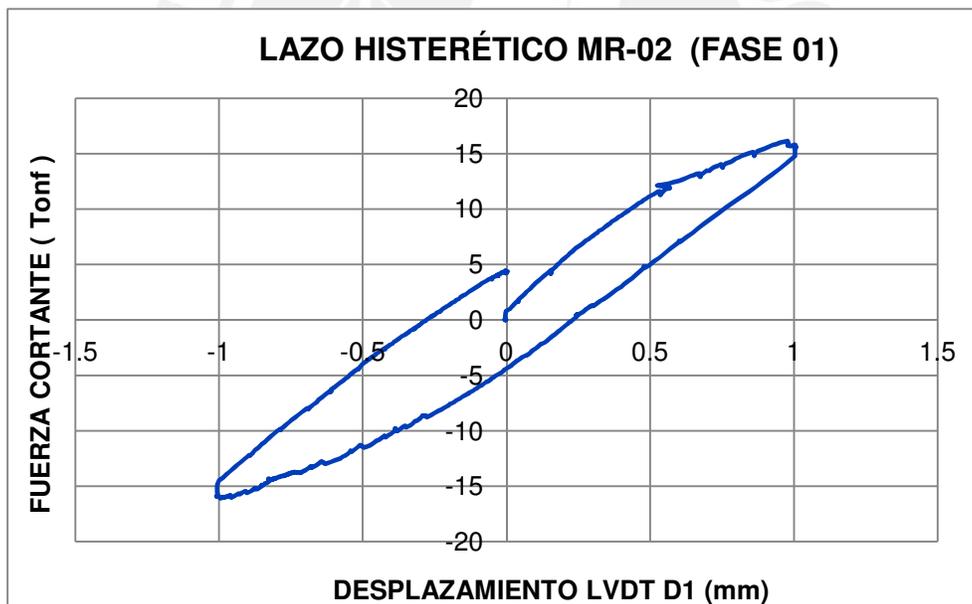


Fig. N° 66: Lazo Histerético Fase 01, muro MR-02 (Rango Elástico).

Para el cálculo de la rigidez lateral se utilizó mínimos cuadrados, empleándose una aproximación lineal (Fig. N° 67 y Fig. N° 68), los resultados son mostrados en las Tablas N°22 y N°23.

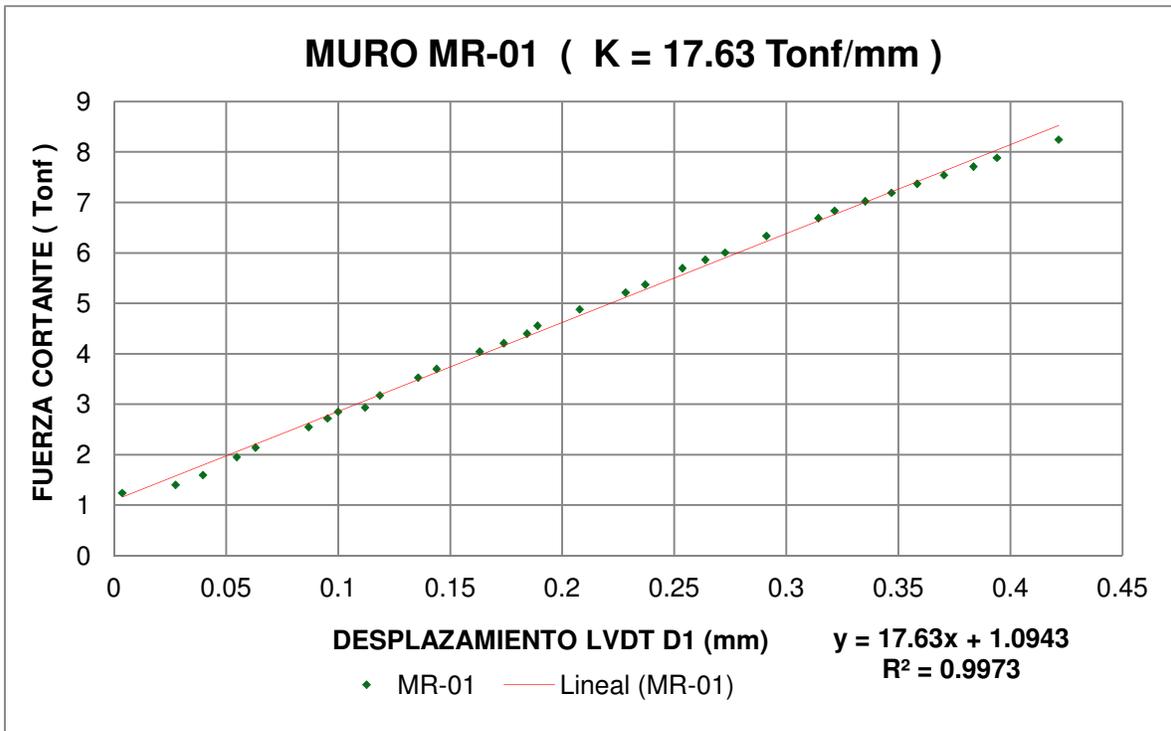


Fig. N° 67: Cálculo de la Rigidez Experimental del Muro MR-01 (Fase N° 01 rango lineal).

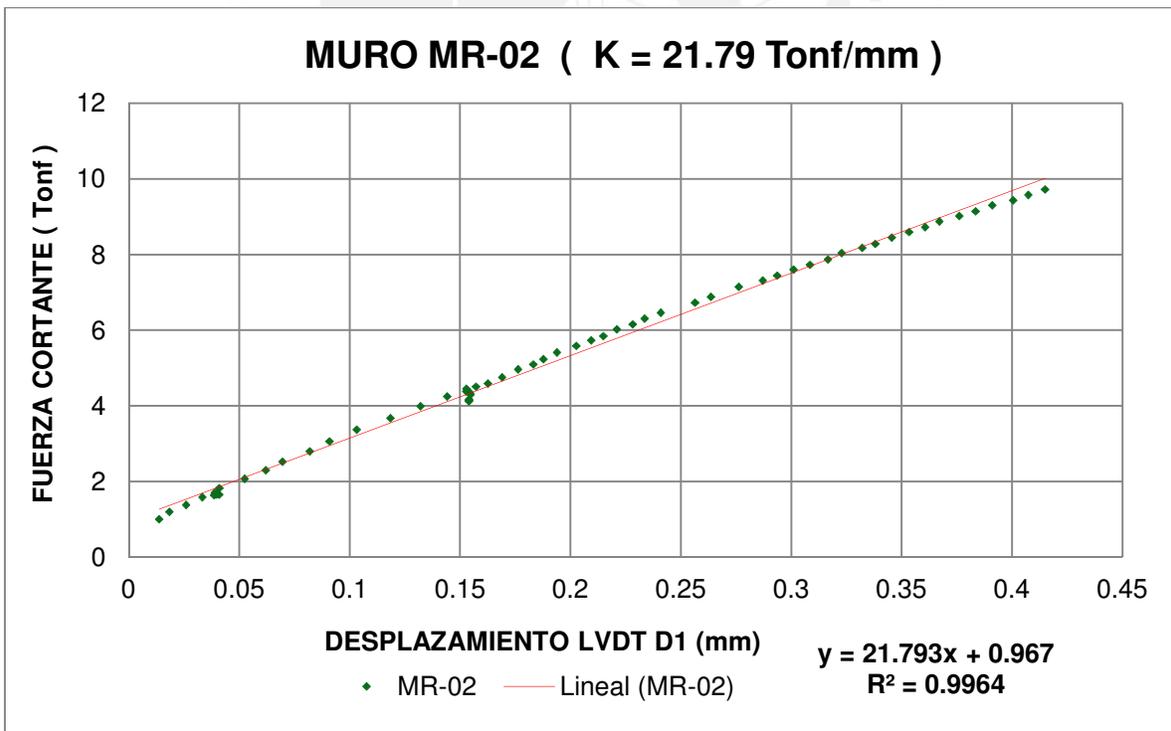


Fig. N° 68: Cálculo de la Rigidez Experimental del Muro MR-02 (Fase N° 01 rango lineal).

Tabla N° 22: Cálculo de Rigidez (K) del Muro MR-01.

Muro MR-01	Punto 01		Punto 02		ΔV (Tonf)	ΔD (mm)	K (Tonf/mm)
	V1 (Tonf)	D1 (mm)	V2 (Tonf)	D2 (mm)			
K1	10.844	0.553	13.382	0.697	2.539	0.144	17.630

Tabla N° 23: Cálculo de Rigidez (K) del Muro MR-02.

Muro MR-02	Punto 01		Punto 02		ΔV (Tonf)	ΔD (mm)	K (Tonf/mm)
	V1 (Tonf)	D1 (mm)	V2 (Tonf)	D2 (mm)			
K2	11.818	0.498	16.285	0.703	4.467	0.205	21.790

Por lo que la rigidez lateral elástica (K) promedio fue **19.71 tonf/mm**. La rigidez experimental del muro fue 19% mayor que la rigidez determinada del análisis teórico en el acápite 4.3 (16.5 tonf/mm).

7.5. Cálculo experimental del módulo de elasticidad de los muros (E)

El módulo de elasticidad se determinó como la pendiente de la gráfica Fuerza Vertical versus el desplazamiento registrado por LVDT D2 en una etapa elástica del muro (fase 01). Se uso mínimos cuadrados con un arreglo lineal para su procesamiento (Fig. N° 69).

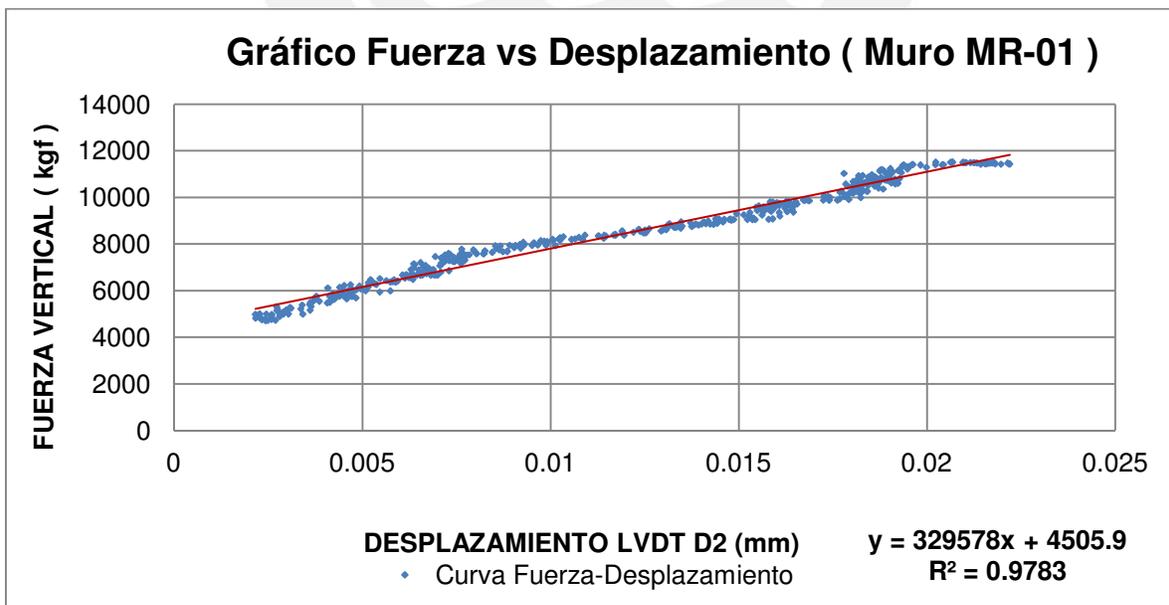


Fig. N° 69: Gráfica Fuerza versus Desplazamiento Vertical Muro MR-01.

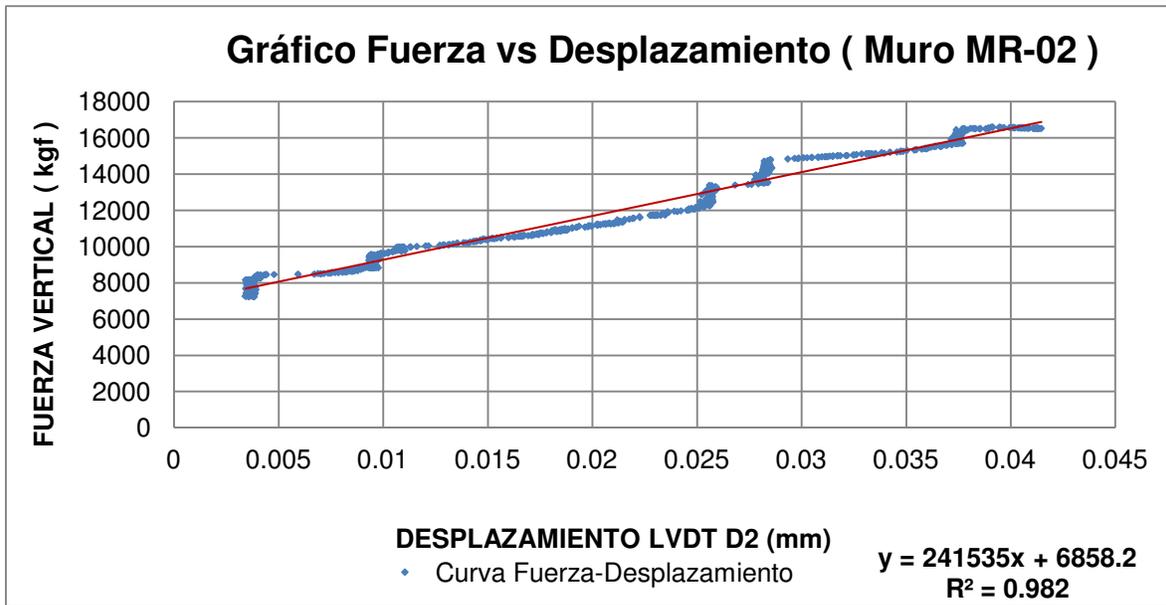


Fig. N° 70: Gráfica Fuerza versus Desplazamiento Vertical Muro MR-02.

Los cálculos para determinar el módulo de elasticidad son mostrados en la Tabla N°24.

Tabla N° 24: Cálculo del Módulo de Elasticidad (Em) en los muros MR-01 y MR-02.

Especímen	Distancia	Área	$\Delta P / \Delta D$	E m
	LVDT D2 (mm)	(cm ²)	(kgf/mm)	(kgf/cm ²)
MR-01	1049.0	4290.0	329578.0	8.06E+04
MR-02	1052.0	4290.0	241535.0	5.92E+04
E prom (kgf/cm²)				6.99E+04

Por lo que el módulo de elasticidad (**E**) promedio fue **69 900 kgf/cm²**. El módulo de elasticidad del muro a escala natural fue 17% mayor que el determinado de los ensayos de pilas en el acápite 3.1.5 (59 500 kgf/cm²).

7.6. Cálculo experimental del módulo de corte de los muros (G)

El módulo de corte se determinó como la pendiente de la gráfica Esfuerzo Cortante versus la Distorsión Angular en una etapa elástica del muro (fase 02). El esfuerzo de corte (τ) se cálculo como el cociente de la diferencia de la carga lateral y el área de corte. Para el procesamiento de datos se emplearon los datos de la fase 02 (primer ciclo) con los registros de los LVDT's D3 y D4 (Fig. N° 71,

Fig. N° 72, Fig. N° 73 y Fig. N° 71) debido a que se podía apreciar mejor los desplazamientos, además se tomaron antes de la aparición de la primera grieta.

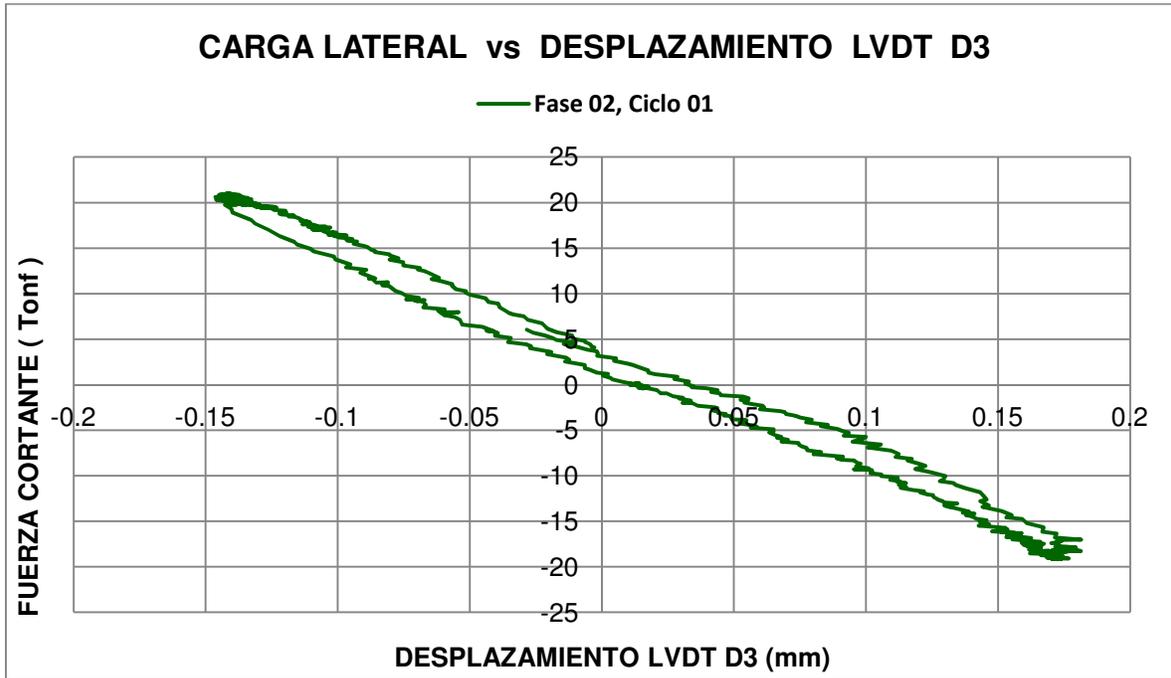


Fig. N° 71: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D3, MR-01.

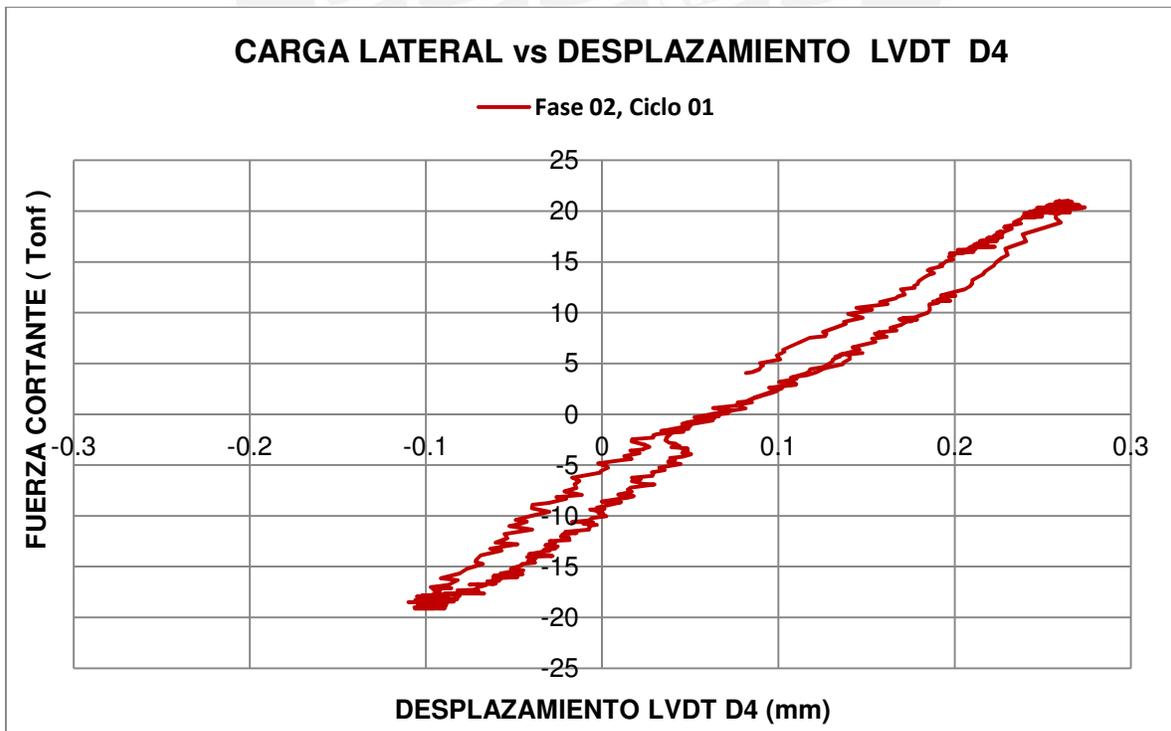


Fig. N° 72: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D4, MR-01.

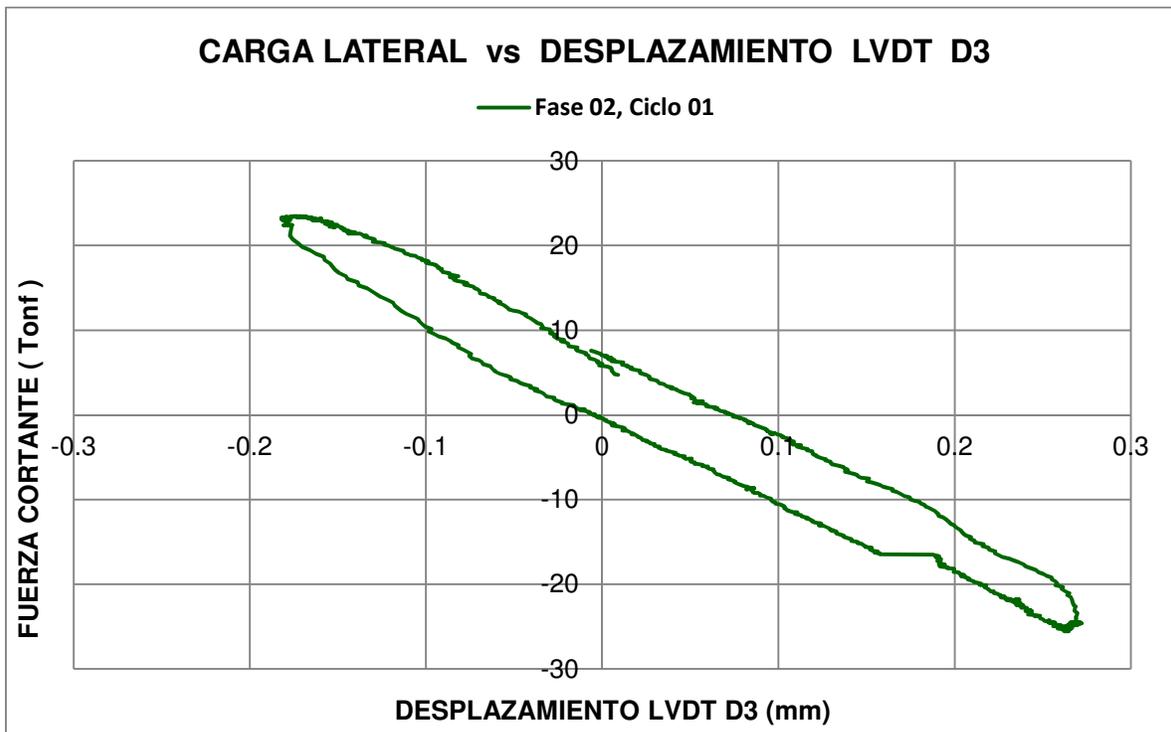


Fig. N° 73: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D3, MR-02.

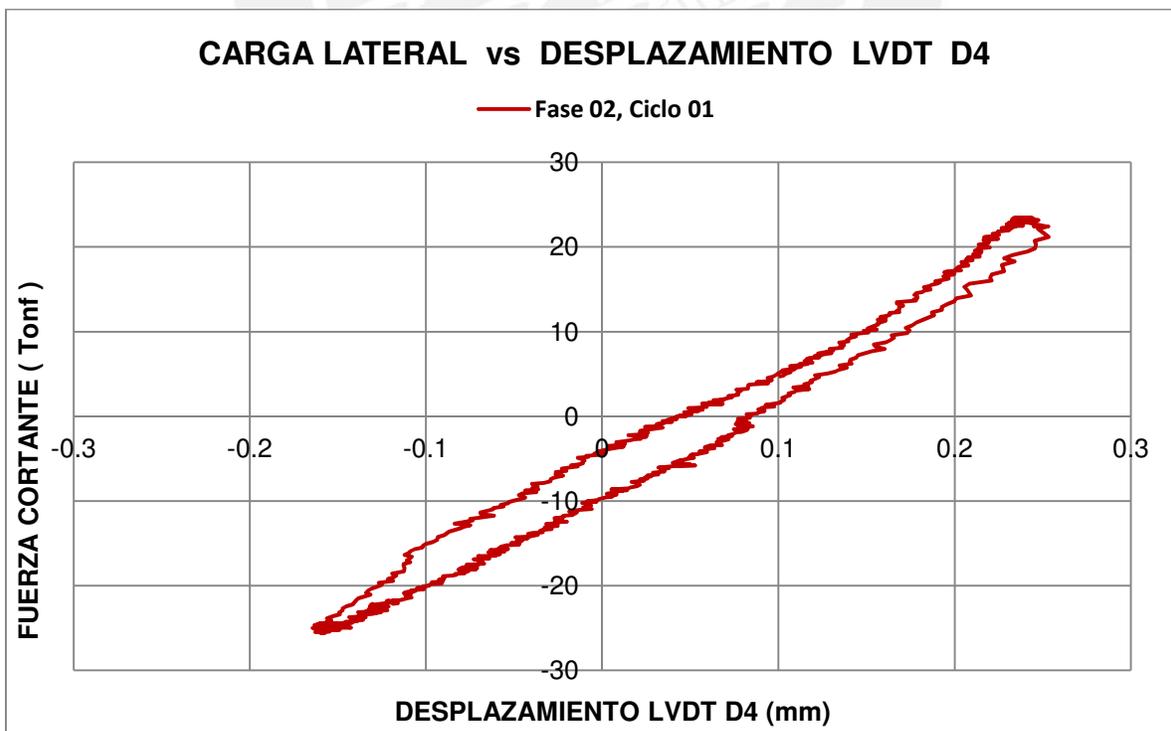


Fig. N° 74: Carga Lateral vs. Desplazamiento LVDT D4, MR-02.

Los cálculos para determinar el módulo de corte son mostrados en la Tabla N°25.

Tabla N° 25: Cálculo del Módulo de Corte (G) en los muros MR-01 y MR-02.

Muro	Longitud	Longitud	Área	$\frac{\Delta\tau}{\Delta D}$ LVDT D3	$\frac{\Delta\tau}{\Delta D}$ LVDT D4	$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta \gamma}$
	LVDT D3 (mm)	LVDT D4 (mm)	(cm ²)	(Kgf/mm)	(Kgf/mm)	
MR-01	1400	1400	4290	120170	96924	1.75E+04
MR-02	1400	1400	4290	118400	132770	2.04E+04
G prom (kgf/cm²)						1.90E+04

Por lo que el módulo de corte (**G**) promedio fue **19 000 kgf/cm²**. El módulo de corte del muro a escala natural fue 46% mayor que el determinado de los ensayos de muretes en el acápite 3.2.5 (13 000 kgf/cm²).

7.7. Resistencia a la tracción por flexión

La primera fisura de tracción por flexión se observó en el muro MR-01 en la fase 2 del ensayo, para una fuerza de 17 tonf, cuyo valor fue mayor en 25% que el valor teórico determinado en el acápite 4.4 (13.5 tonf). Para el muro MR-02, la fuerza asociada a la primera fisura fue de 18.5 tonf, se presentó en la fase 2, valor que resultó 26% mayor al valor determinado en el análisis teórico (14.7 tonf acápite 4.4). Además se aprecia que la carga asociada a la primera fisura del muro MR-02 es mayor en 9% que la del muro MR-01.

7.8. Resistencia al agrietamiento diagonal

La falla por corte en el MR-01 se presentó para una grieta de 0.80 mm en la fase 5 con una carga de 37.2 tonf, valor que fue mucho mayor que la resistencia teórica al agrietamiento diagonal determinado en el acápite 4.1.1 (21.3 tonf). Esto se debió fundamentalmente a la determinación del valor de v_m (resistencia al corte diagonal) de los muretes, ya que en los ensayos fallaron localmente (Fig. N° 75), haciendo que no se llegara a su capacidad real de resistencia. Para el muro MR-02 ocurrió lo mismo llegando a un valor 42.2 tonf contra el valor teórico obtenido de 22.4 tonf (acápite 4.1.1), para ambos muros se presentaron fisuras máximas de 0.80 mm (MR-01) y 1.30 mm (MR-02) en el agrietamiento diagonal.



Fig. Nº 75: Falla local concentrada en el murete.

7.9. Resistencia máxima

En ambos muros la resistencia máxima se alcanzó durante la fase 5 del ensayo, lográndose valores de 37.2 tonf para MR-01 y 42.2 tonf para MR-02. A nivel de cargas la resistencia para el muro MR-02 fue 13% mayor que la del muro MR-01.

7.10. Comportamiento del refuerzo vertical en columnas

En vista que los muros MR-01 y MR-02 alcanzaron cargas máximas de 37.2 tonf y 42.2 tonf, valores que superan largamente la resistencia máxima teórica a flexión asociada a la fluencia del refuerzo vertical calculada en el acápite 4.5 (19.7 tonf), el acero vertical debería haberse deformado hasta nivel de pasar a la zona de endurecimiento. Lo cual se verificó experimentalmente con los registros de los LVDT's D5 y D6.

Verificación de la deformación unitaria en fluencia con la deformación máxima alcanzada en el ensayo:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_y} = 0.002 \quad y \quad \epsilon_{max} = \frac{D}{L}$$

Donde:

ϵ_y : Deformación unitaria en fluencia para el acero.

E_y : Módulo de elasticidad del acero = 2 100 000 kgf/cm².

ϵ_{max} : Deformación registrada por LVDT D5 y LVDT D6.

L: Distancia entre la base de los sensores = 300 mm.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero definida en el acápite 2.7.

Tabla N° 26: Deformaciones unitarias registradas LVDT D5 y LVDT D6.

MURO	V (Tonf)	L (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)	ϵ (mm/mm)
MR-01	-32.65	300	-	3.137	0.010
	37.23	300	6.416	-	0.021
MR-02	-38.38	300	-	4.099	0.014
	42.15	300	6.392	-	0.021

En la Tabla N° 26 se puede apreciar que el refuerzo incurrió en el rango inelástico superando la deformación unitaria en fluencia, cuyos valores alcanzaron máximos de 0.021 ($10 \epsilon_y$).

7.11. Comportamiento de la malla electrosoldada de refuerzo

Al igual que el refuerzo vertical también se verificó si el acero de la malla electrosoldada llegó al estado de fluencia a través del registro de deformaciones de los LVDT's D7 y D8, cuyos sensores fueron ubicados justo en la unión columna-albañilería (zona cubierta con tarrajeo y malla).

Verificación de la deformación unitaria en fluencia del acero de la malla con la deformación máxima alcanzada en el ensayo:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_y} = 0.0024 \quad \text{y} \quad \epsilon_{\max} = \frac{D}{L}$$

Donde:

ϵ_y : Deformación unitaria en fluencia para el acero de la malla.

E_y : Módulo de elasticidad del acero = 2 100 000 kgf/cm².

ϵ_{\max} : Máxima Deformación registrada por LVDT D7 o LVDT D8.

L: Distancia entre la base de los sensores = 200 mm.

f_y : Resistencia a la fluencia del acero de la malla definida en el acápite 2.8.

Como se aprecia en la Tabla N° 27, el refuerzo de la malla electrosoldada se comportó elásticamente, debido a que sus deformaciones no excedieron el valor de la deformación unitaria elástica (ϵ_y), siendo el máximo valor de deformación unitaria de 0.001 ($42\% \epsilon_y$).

Tabla N° 27: Deformaciones unitarias registradas LVDT D7 y/o LVDT D8.

MURO	V (Tonf)	D (mm)	L (mm)	ϵ (mm/mm)
MR-01	37.23	0.198	200	0.001
MR-02	42.15	0.146	200	0.001

7.12. Grosor máximo de grietas

Para cada fase del ensayo se indica el grosor máximo que tuvo la grieta diagonal, el cual fue registrado por los LVDT's D3 y D4 en la parte central del muro. En la Fig. N° 76 se aprecia un valor máximo de 0.80 mm para el muro MR-01 y un valor de 1.3 mm para el muro MR-02 ambos se manifestaron en la fase 5 del ensayo.

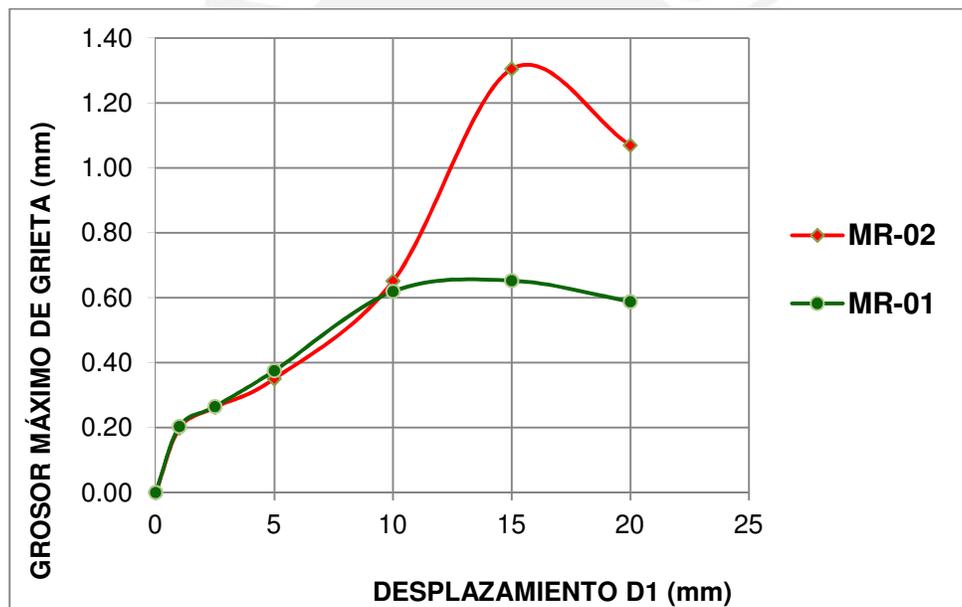


Fig. N° 76: Tamaño máximo de grietas diagonales para MR-01 y MR-02.

7.13. Comparación de los resultados obtenidos con ensayos anteriores

De acuerdo a los resultados obtenidos, tanto en el muro MR-01 como en el muro MR-02 no se presentó la trituration de la unidad de albañilería, ya que esto fue debidamente controlado por la malla electrosoldada. El comportamiento de los muros se vio enormemente mejorado con respecto a los ensayos realizados por la investigación realizada por Araoz y Velezmoro en el 2012 (muro de ladrillo

pandereta sin reforzamiento) [Ref. 3], también se puede apreciar algo similar en la investigación realizada por Salinas y Lázares en el 2007 [Ref. 8]. En ambos muros ocurrió la trituración de los talones en las columnas similar al ocurrido en la tesis de Araoz y Velezmoro.

Se aprecia en la Fig. N° 77 que a mayor carga vertical la resistencia del muro aumenta, y con mayor razón si se emplea malla electrosoldada para evitar la trituración de los ladrillos pandereta. Los resultados mostrados para M1 y M2 corresponden a muros sin carga vertical, M1 sin malla de refuerzo, mientras que M2 se reforzó con malla electrosoldada de 4.5mm [Ref. 3]. Allí se logró resistencias de 20.0 y 29.2 ton, con esfuerzos cortantes similares de 7.0 kg/cm^2 . En los muros MR-01 y MR-02 con malla de 6 mm, se ha obtenido esfuerzos cortantes de 9.0 y 10.0 kg/cm^2 , debido a la carga vertical y la malla más gruesa respecto al caso anterior.

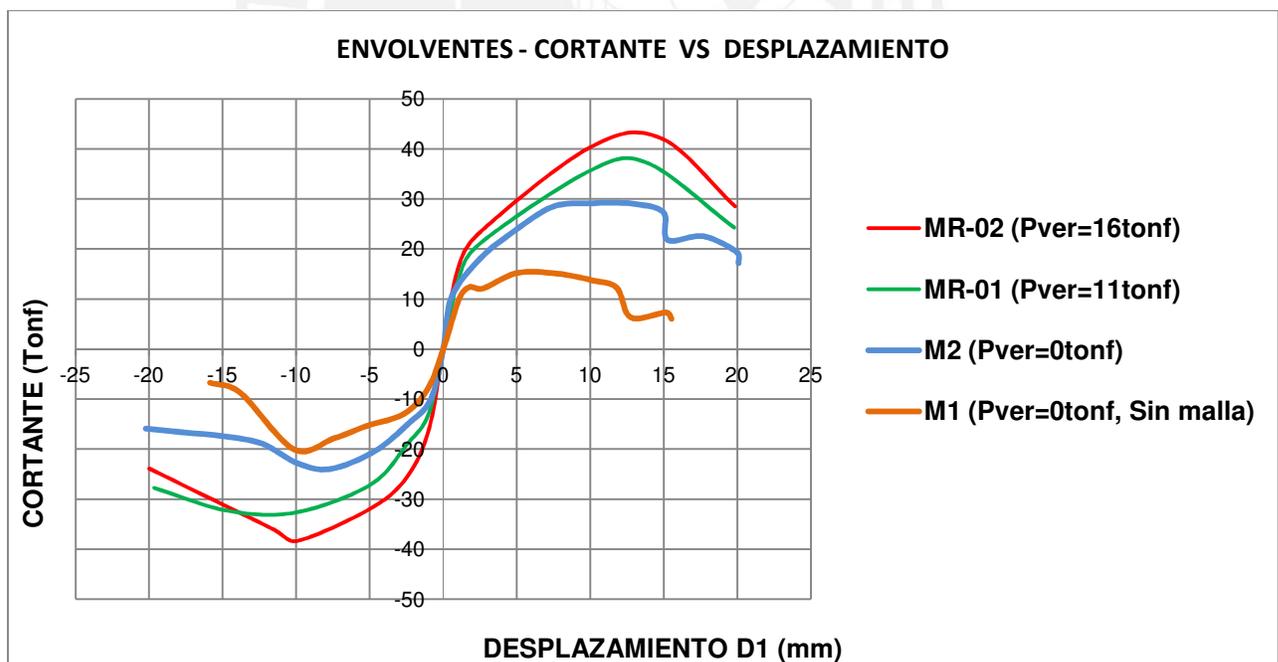


Fig. N° 77: Comparación de Envoltorios Cortante-Desplazamiento (Datos M1 y M2: Araoz y Velezmoro, 2012).

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las conclusiones vertidas sobre el trabajo realizado sobre esta tesis se encuentran limitadas por la escasa cantidad de muros ensayados. Pero cabe resaltar que los resultados obtenidos en el objetivo de mejorar el comportamiento de muros construidos con ladrillo pandereta han sido satisfactorios. Se ha visto que el reforzamiento con malla electrosoldada incrementó enormemente la resistencia y a la vez evitó la trituración de los ladrillos, para niveles de carga con gran magnitud como las apreciadas en los ensayos. Para un mejor entendimiento de estas conclusiones, debe mencionarse que ambos muros tuvieron las mismas características constructivas, pero distintos niveles de carga vertical en los ensayos ($P_{ver} = 11 \text{ tonf}$ para MR-01 y $P_{ver} = 16 \text{ tonf}$ para MR-02).

8.1. Conclusiones

1. De acuerdo a la Norma E.070, la unidad de albañilería empleada en el proyecto calificó como tipo I ($f'_b = 57 \text{ kgf/cm}^2$). Además presentó una variabilidad dimensional y alabeo aceptables. Este tipo de ladrillo está prohibido para la construcción de muros portantes, solo es permitido para tabiques y parapetos.
2. La succión de los ladrillos pandereta fue de $37 \text{ gr/ (200 cm}^2\text{-min)}$, por lo cual se tuvo que realizar un tratamiento en la construcción de los especímenes durante 30 minutos, doce horas previas a su utilización.
3. La resistencia a compresión axial de la albañilería simple reforzada fue de $f'_m = 27 \text{ kgf/cm}^2$ y al corte diagonal $v'_m = 9 \text{ kgf/cm}^2$. Para las pilas se observó un comportamiento aceptable el cual fue controlado por la malla y se evitó la trituración de la unidad; lo mismo pasó para los muretes, cuya falla se concentró localmente en los puntos de aplicación de la carga. Esto no permitió conocer la resistencia que pudieran alcanzar los muretes.
4. El módulo de elasticidad para los muros de albañilería tubular reforzados con malla fue de $69\,900 \text{ kgf/cm}^2$, valor que fue 17% mayor que el determinado para las pilas. La expresión $E_m = 500 f'_m$ (Norma Técnica

- E.070, 2006) no es aplicable para nuestro caso, pues fue deducida para unidades macizas.
5. El módulo de corte determinado de los ensayos de laboratorio para los muros reforzados fue de 19 000 kgf/cm², valor 46% mayor que el determinado para muretes.
 6. La rigidez lateral de los muros reforzados determinado experimentalmente fue de 19.7 tonf/mm, valor mayor en 19% del calculado teóricamente ($K=16.5$ tonf/mm).
 7. La aparición de las fisuras de tracción por flexión fueron a niveles de carga de 17 tonf y 18.5 tonf para MR-01 y MR-02 respectivamente, valores que al compararlos con los determinados de manera teórica fueron mayores en 25%.
 8. El cálculo teórico para el agrietamiento diagonal tuvo una variación importante con respecto a los valores obtenidos en los ensayos. Esto se debió fundamentalmente al valor de v_m (resistencia al corte de muretes) empleado para los cálculos, debido a que en los ensayos no se alcanzó su verdadera capacidad por presentarse una falla localizada en las esquinas donde se aplicaron las cargas. Se alcanzó cargas de agrietamiento diagonal de 37.2 tonf y 42.2 tonf para los muros MR-01 y MR-02 respectivamente.
 9. En ambos muros, la degradación de la resistencia se presentó durante la fase 5 del ensayo, para una deriva de 0.006 cuyo valor representa un 20% más que la deriva máxima reglamentaria (0.005). La falla de los muros fue por deslizamiento, el cual se debió inicialmente a la falla por corte de las columnas en los talones con presencia de trituración y fluencia del acero vertical para este nivel.
 10. El acero vertical en la zona de los talones de las columnas llegó a niveles máximos de deformaciones unitarias de 0.021 ($10\epsilon_y$), incursionando en el rango inelástico durante la fase 5.

11. Las fisuras diagonales fueron controladas enormemente por la malla electrosoldada llegándose a valores máximos de 0.8 mm y 1.3 mm para los muros MR-01 y MR-02, respectivamente.
12. El refuerzo de acero de la malla electrosoldada no incurrió en el rango inelástico, se llegó a niveles de 42% del valor de la deformación unitaria de fluencia (0.0024).
13. La carga vertical fue un factor fundamental en el incremento de la resistencia lateral en el muro MR-02 con respecto al muro MR-01, determinándose un 13% de incremento.

8.2. Líneas Futuras de Investigación

En un marco general, el proceso constructivo fue óptimo y adecuado, lo cual se expresó en los resultados similares que se obtuvieron en los muros, viéndose el mismo tipo de falla y la aparición del agrietamiento diagonal para niveles de carga considerables. Asimismo, el comportamiento estructural fue adecuado, sin embargo quedaron algunas incertidumbres por lo que la investigación se debería continuar analizando los siguientes ítems:

1. El valor de v_m fue elevado, pero aun así no se alcanzó la capacidad máxima que se podría alcanzar si se hubiese evitado la falla local en el ensayo de los muretes. Se propone rellenar enteramente los alveolos de la unidad para ver los efectos producidos con este ajuste.
2. En el ensayo de los muros se produjo la trituración de la columna en los talones, lo cual se debió fundamentalmente a las elevadas cargas alcanzadas por los muros. Se propone usar columnas con más sección transversal para observar hasta qué niveles de carga se podría alcanzar evitándose este tipo de falla.
3. La carga vertical fue un factor determinante en el incremento de la resistencia ante carga lateral, como se observó en la investigación. Se propone ensayar muros con niveles de carga representativos de mayor magnitud, para determinar si se mantiene esta tendencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALCOCER, Sergio, AGUILAR, Gerardo
2001 “Efectos del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales”. México DF, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- [2] ALCOCER, Sergio, RUIZ Juan, PINEDA José, y ZEPEDA J.A.
1996 “Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh”. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 1417, Acapulco, Mexico, pp. 01-10.
- [3] ARAOZ, Tania y VELEZMORO, Jhonatan
2012 “Reforzamiento de viviendas existentes construidas con muros confinados hechos con ladrillo pandereta”. Tesis de Licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [4] BARR, Krishan y PINEDA, Cesar
2011 “Control de la trituración de los ladrillos huecos mediante malla de refuerzo en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica”. Tesis de Licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA
2008 “Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI Vivienda”, Segunda Edición, Lima, pp. 176-179.
- [6] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO-SENCICO
2006 (DS N° 011-2006-Vivienda), Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma técnica E.030 Diseño Sismo Resistente, Lima, pp. 208-215.
- [7] MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO-SENCICO
2006 Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma técnica E.070 Albañilería, Lima, pp. 295-309.
- [8] SALINAS, Rafael y LÁZARES, Fernando
2007 “La albañilería tubular y su uso en viviendas en zonas sísmicas”. Conferencia Internacional en Ingeniería Sísmica. CISMID-UNI, Lima, pp. 01-13.

- [9] SAN BARTOLOMÉ, Ángel
2007 “Defectos que incidieron en el comportamiento de las construcciones de albañilería en el sismo de Pisco del 15-08-2007”. Blog <http://blog.pucp.edu.pe/blog/albanileria>
- [10] SAN BARTOLOMÉ, Ángel, QUIUN, Daniel y SILVA, Wilson
2011 “Diseño y Construcción de Estructuras Sismo Resistentes de Albañilería”. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial.
- [11] PINEDA, José, y ALCOCER, Sergio
2004 “Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla de alambre soldado”. México DF, Centro Nacional de Prevención de Desastres.

