



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“Reparación de un Muro de Albañilería Confinada mediante varillas
de Fibra de Vidrio”
Área de Estructuras

Tesis para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL

Presentada por:
Juan Macías Loayza Seminario

LIMA – PERÚ
2008



A mis padres, Andrés y Rosa
fuente y soporte de todos mis logros;
al profesor Ángel San Bartolomé,
quien me brindó todo su apoyo
para la culminación de este trabajo.

RESUMEN

Este trabajo de tesis presenta la reparación de un muro de albañilería confinada ensayado previamente a carga lateral cíclica [Tesis de Nancy Janampa, 2003], presentando una falla por corte con grietas y daño en la estructura. El informe esta dividido en tres partes:

En la primera parte se efectuó la recopilación y análisis de resultados correspondientes al muro original de albañilería confinada, así como también de los resultados obtenidos frente a ensayos de compresión diagonal de muretes, compresión de pilas de muretes, y ensayos de control hechos sobre los materiales originales.

En la segunda parte, se realizó la reparación del muro mediante una técnica novedosa en el país, basada en el uso de varillas de fibra de vidrio la cual contó con la mano de obra calificada del personal técnico del Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Esta técnica pretende ser una alternativa a los ya existentes métodos de reparación. También, en esta parte se consideran los ensayos de los elementos empleados en la reparación del muro.

Finalmente, la última parte considera el ensayo del muro reparado a una carga lateral cíclica similar a la utilizada en el muro original, para poder así comparar resultados en cuanto a resistencia, rigidez y ductilidad.

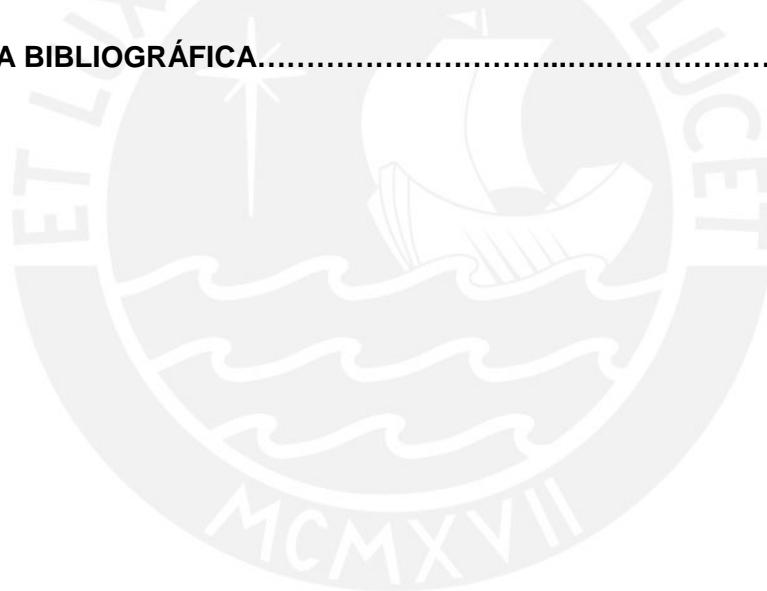
ÍNDICE

	Pág.
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	2
Capítulo 3. MATERIALES.....	3
3.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MURO ORIGINAL.....	3
3.1.1 Unidad de albañilería.....	3
3.1.2 Mortero.....	6
3.1.3 Concreto.....	7
3.1.4 Acero de refuerzo.....	7
3.2 MATERIALES PARA LA REPARACIÓN DEL MURO.....	8
3.2.1 Mortero.....	8
3.2.2 Concreto de Reparación.....	11
3.2.3 Puente de adherencia SikaDur 32Gel.....	13
3.2.4 Varilla de polímero reforzado con fibra de vidrio GFRP.....	14
Capítulo 4. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE.....	17
4.1 GENERALIDADES.....	17
4.2 RESULTADOS.....	17
4.2.1 Pila de ladrillos.....	17
4.2.2 Muretes de ladrillo.....	18
Capítulo 5. MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA.....	19
5.1 DESCRIPCIÓN DEL ESPECIMEN.....	19
5.2 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	20
Capítulo 6. ENSAYO DEL MURO ORIGINAL A CARGA LATERAL CÍCLICA.....	25
6.1 GENERALIDADES.....	25
6.2 INSTRUMENTACIÓN.....	26
6.3 MONTAJE DEL MURO.....	29
6.4 ENSAYO DEL MURO DE ALBAÑILERÍA.....	30

Capítulo 7. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MURO ORIGINAL.....	31
7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FALLAS DURANTE EL ENSAYO.....	31
7.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MURO.....	37
7.3 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN.....	39
7.4 AGRIETAMIENTO DIAGONAL.....	40
7.5 CARGAS Y DESPLAZAMIENTOS.....	41
7.6 CAPACIDAD RESISTENTE MÁXIMA DEL MURO.....	42
Capítulo 8. REPARACIÓN DEL MURO DE ALBAÑILERÍA.....	43
8.1 GENERALIDADES.....	43
8.2 TÉCNICA DE REPARACIÓN.....	44
Capítulo 9. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA DEL MURO REPARADO..	61
9.1 GENERALIDADES.....	61
9.2 INSTRUMENTACIÓN.....	61
9.3 MONTAJE DEL MURO.....	61
9.4 ENSAYO DEL MURO REPARADO.....	63
Capítulo 10. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MURO REPARADO.....	65
10.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FALLAS DURANTE EL ENSAYO.....	65
10.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MURO.....	72
10.3 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN.....	72
10.4 AGRIETAMIENTO DIAGONAL.....	73
10.5 CARGAS Y DESPLAZAMIENTOS.....	74
10.6 CAPACIDAD RESISTENTE MÁXIMA DEL MURO.....	76
Capítulo 11. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MUROS.....	77
11.1 RIGIDEZ LATERAL.....	77
11.2 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN.....	78



11.3	AGRIETAMIENTO DIAGONAL.....	78
11.4	CAPACIDAD MÁXIMA.....	79
11.5	TIPO DE FALLA.....	79
Capítulo 12. FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....		81
12.1	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN.....	81
12.2	COMPARACIÓN DE COSTOS.....	82
Capítulo 13. CONCLUSIONES.....		83
13.1	CONCLUSIONES GENERALES.....	83
13.2	LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN.....	84
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....		86



1. INTRODUCCIÓN

Nuestro país es indudablemente un país sísmico, que ha sufrido en muchas ocasiones la presencia de eventos telúricos importantes que han causado gran cantidad de pérdidas humanas así como materiales, y que han dejado sin hogar e infraestructura a miles de personas e instituciones, ocasionando con esto grandes pérdidas económicas que tardan años en ser compensadas.

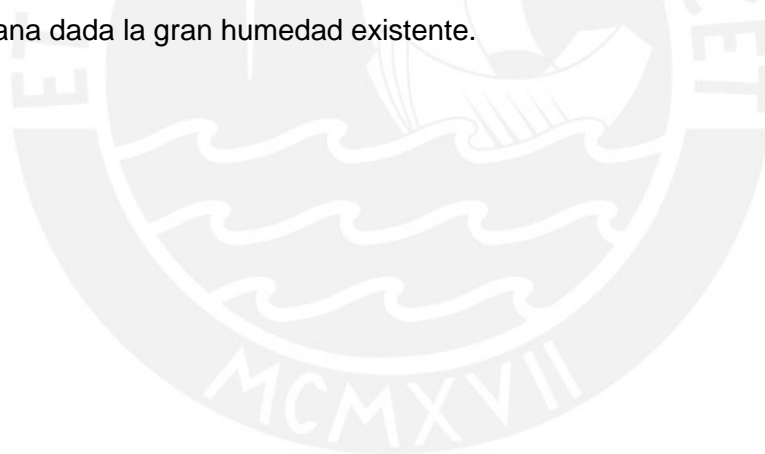
El miedo a ingresar en una casa u oficina que presenta grandes grietas en su estructura es un factor determinante que hace que la mayoría de personas desconfíen y opten por no seguir utilizando dichos lugares. Sumado a esto, debemos considerar la pérdida de tiempo y dinero al tener una infraestructura sin utilizar. Frente a estos hechos existen dos alternativas claras: la primera es un desalojo y posterior demolición de la estructura, opción que viene a ser económicamente cara en vista de los costos de demoler, transportar y eliminar el material para luego preparar el terreno y empezar una nueva construcción; y la segunda opción es utilizar métodos de reparación con perspectivas de conseguir recuperar la resistencia inicial de la estructura, su rigidez y ductilidad. En esta segunda opción se debe tratar de disminuir los costos directos de mano de obra y materiales, todo esto sin dejar de lado el factor tiempo. Actualmente en el Perú existen numerosos edificios de albañilería confinada que podrían fallar por corte en futuros sismos severos. En un proyecto anterior se estableció un plan para reparar estos edificios con diversas técnicas (San Bartolomé y Castro, 2003, Ref. 1).

En este proyecto se plantea el empleo de varillas de fibra de vidrio (GFRP) como una técnica adicional que permita ampliar las alternativas de reparación existentes. Con este fin se utilizaron las varillas de fibra de vidrio como refuerzo horizontal y se reparó un muro de albañilería confinada que previamente había fallado por fuerza cortante en un ensayo de carga lateral cíclica [Ref. 2].

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El proyecto tiene como principal objetivo comprobar experimentalmente la efectividad de una técnica de reparación de muros de albañilería confinada que hayan fallado por fuerza cortante, basada en el uso de varillas de fibra de vidrio. Con la utilización de este método de reparación se espera mejorar el comportamiento sísmico del muro, recuperando el mayor porcentaje posible de rigidez, resistencia y ductilidad.

Con esta finalidad, se presentan los datos, ensayos y conclusiones a las que se llegaron del análisis de los resultados del ensayo de carga lateral cíclica, pretendiendo así, incentivar el uso de este método de reparación debido a su bajo costo, tanto en mano de obra como en materiales, la rapidez con la cual se puede contar con la estructura para su uso, la ventaja de recuperar un buen porcentaje de la capacidad máxima resistente, y la característica importante de las varillas de refuerzo, de no presentar corrosión por humedad en vista que utiliza polímeros de fibra de vidrio (GFRP) en lugar de acero, esta última característica es especialmente importante en la costa peruana dada la gran humedad existente.



3. MATERIALES

3.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MURO ORIGINAL

En este capítulo se describe, utilizando la información de la referencia 2, las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del muro original.

3.1.1 Unidad de albañilería

Las unidades de albañilería utilizadas para la construcción del muro fueron ladrillos KK de 18 huecos de arcilla, de fabricación industrial provenientes de la fabrica ItalGres industrial S.A. (Italcerámica). Sus dimensiones nominales fueron de 23x13x9 cm, con perforaciones perpendiculares a la cara de asiento que reducen el área neta a menos del 70% del área bruta y que le dan la denominación de unidades huecas.

a) Variación dimensional

La variación dimensional (ITINTEC 331.017) obtenida de una muestra de 5 unidades tomadas del lote que se utilizó para la construcción del muro, arrojó en el caso más extremo (altura de la unidad) una variación de apenas 1.1%; siendo este resultado un buen índice de la uniformidad geométrica de las unidades de albañilería. La tabla 3.1 muestra el resultado obtenido.

Tabla 3.1
Variación Dimensional del ladrillo

	Largo	Ancho	Altura
Variación (%)	0.6	0.4	1.1

b) Alabeo

Esta prueba (ITINTEC 331.018) también se efectuó en 5 unidades de albañilería representativas del lote para la construcción del muro, el promedio de las mediciones en ambas caras permitió verificar que el alabeo de las unidades era mínimo y que en general tenían un óptimo acabado exterior para ser utilizados en los muros. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 3.2.

Tabla 3.2
Alabeo del ladrillo

	Cara de la Unidad N°1	Cara de la Unidad N°2
Alabeo promedio (mm)	0.75	0.65

De los resultados obtenidos tanto en la variación dimensional y el alabeo, se pudo definir que el espesor de las juntas de albañilería sean de 1.0 cm, tanto vertical como horizontal.

c) Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una propiedad que indica la calidad de la unidad empleada, esta característica es la más importante para los fines estructurales. La resistencia característica a compresión axial de la unidad de albañilería obtenida fue $f'_b=184 \text{ kg/cm}^2$.

Según las características obtenidas en los ensayos, la unidad de albañilería calificó como TIPO V (Tabla 3.3). Las principales características de éste tipo de ladrillo son su alta resistencia y durabilidad, además que pueden ser utilizados bajo condiciones de servicio rigurosas. En vista que estos ladrillos son muy comerciales podemos considerar que se trabajó con unidades muy representativas de la actividad constructiva del país, aunque la Norma E-070 no permite el uso de unidades huecas para la construcción de muros portantes de albañilería confinada en la zona sísmica 2 y 3.

Tabla 3.3

Clasificación de las unidades de albañilería para fines Estructurales, según la Norma E-070 “Albañilería”

CLASE	VARIACIÓN DE LA DIMENSION (máxima en porcentaje)			ALABEO (máximo en mm)	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN f'_b mínimo en MPa (kg/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 P ⁽¹⁾	± 4	± 3	± 2	4	4,9 (50)
Bloque NP ⁽²⁾	± 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

d) Densidad

La densidad está relacionada directamente con la resistencia a compresión, y para su evaluación se usa el principio de Arquímedes. Para poder hallarla, es necesario medir el área neta de una cara de la unidad de albañilería, además de que debemos calcular la succión y la absorción de la unidad.

Para poder realizar estos cálculos se utilizaron las unidades enteras provenientes de los ensayos de variación dimensional y del alabeo. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.4

Tabla 3.4

Absorción, Succión y Densidad del ladrillo

Característica	Medida
Absorción (%)	12
Succión (gr/200 cm ² -min)	31
Densidad (gr/cm ³)	2.00

Según los resultados se determinó que las unidades de albañilería sobrepasaban la succión óptima recomendada [Ref. 4], que dice que las unidades antes de ser asentadas deben estar en el rango de succión comprendida entre 10 a 20 gr/200 cm² – min; debido a este motivo se regaron durante media hora todas las unidades un día antes de ser asentados.

Con respecto al resultado de Absorción, ésta se encontró dentro de los parámetros recomendados de menos de 22% [Ref. 5].

3.1.2 Mortero

Para adherir las unidades de albañilería, se utilizó mortero compuesto por cemento Pórtland Tipo I, arena gruesa y agua. El aglomerante lo conforma el cemento, aportando resistencia, mientras que la arena proporciona estabilidad a la mezcla, permitiendo el asentado de varias hiladas en una jornada de trabajo, así como también controla la contracción por secado.

El mortero utilizado para la construcción del muro tuvo una proporción volumétrica cemento: arena de 1:4 (Fig. 3.1).



Fig. 3.1
Arena gruesa utilizada.

3.1.3 Concreto

Para la elaboración de las columnas, la viga solera y la viga de cimentación se optó por utilizar concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, que fue preparado por el personal del Laboratorio de Estructuras (Fig. 3.2); no se realizaron ensayos de control.



Fig. 3.2 Preparación del concreto.

3.1.4 Acero de refuerzo

En la construcción de los elementos estructurales del muro se utilizó acero grado 60 (Fig. 3.3), no se realizaron pruebas de control.



Fig. 3.3 Acero utilizado.

3.2 MATERIALES PARA LA REPARACIÓN DEL MURO

En este capítulo se describe las propiedades de los materiales utilizados en la reparación del muro de albañilería. Esta etapa fue realizada por el tesista.

3.2.1 Mortero

Con la finalidad de controlar la calidad del mortero utilizado en las reparaciones, se realizaron pruebas de compresión a probetas de mortero en forma de cubos de 5cm de lado, las cuales se muestran en la Figura 3.4.



Fig. 3.4 Cubos de mortero de 5cm de lado para ensayos a compresión.

Durante la reparación se utilizó dos clases distintas de mortero, la primera con una relación cemento: arena de 1:4, que fue utilizada para reparar las grietas de la albañilería y para sellar las juntas donde se colocaron las varillas; la segunda clase tuvo una dosificación cemento: arena de 1:3 y epóxico en polvo para mejorar la adherencia en una cantidad equivalente al 2% del peso del mortero, lo que equivale a una tapita de gaseosa, este tipo de mortero se utilizó en la reparación de las fisuras del concreto y una cangrejera que se presentó durante el vaciado.

Se utilizó cemento Pórtland Tipo I, y el agregado fue arena gruesa natural libre de materia orgánica y sales.

a) Ensayo de compresión

Para la fabricación de las probetas cúbicas de mortero, se empleó un molde de madera, y el mortero fue colocado compactándose en tres capas, con un pisón de plástico (Fig. 3.5). Luego se curaron durante 1 semana en un recipiente con agua. Para desmoldar los cubitos simplemente se aflojaron las tapas extremas del molde de madera y se recuperaron los cubitos cuidando de no romperlos ni afectar ninguna de sus caras ni esquinas.



Fig. 3.5 Molde de madera y pisón de plástico para compactar en tres capas las probetas de mortero.

El ensayo (Fig. 3.6) se realizó a una velocidad de desplazamiento de 1.0mm/min, en la Máquina Universal del Laboratorio de Estructuras. Las probetas fueron ensayadas aplicándoles una carga sobre la cara más lisa y no se les aplicó ningún caping durante el ensayo. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos



Fig. 3.6 Ensayo de compresión en dados de mortero.

Tabla 3.5

Resultados del ensayo a compresión de probetas de mortero

Tipo (*)	Área (cm ²)	Carga (KN)	Esf. Final (kg/cm ²)	Desv. Esf. (kg/cm ²)	Prom. Esf. (kg/cm ²)	Dispersión
A1	26.27	42.07	157.11	13.51	143.50	9.4%
A2	25.75	37.61	143.29			
A3	25.76	34.16	130.10			
B1	25.50	14.36	55.25	4.62	56.47	8.2%
B2	26.01	13.94	52.58			
B3	25.00	15.69	61.57			

(*) Tipo A: Mortero 1:3 con 2% en peso de epóxico; Tipo B: Mortero 1:4

En la tabla 3.5 se observa que el mortero Tipo A tuvo una resistencia promedio de 144kg/cm², mientras que la resistencia del mortero Tipo B fue apenas de 57kg/cm². La resistencia del mortero Tipo A fue baja considerando que fue aplicado en concreto con resistencia alta ($f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$), esto puede ocasionar una zona de debilidad en las columnas. En el caso del mortero Tipo B, la resistencia es el 30% de la resistencia a compresión de las unidades de albañilería, por lo cual también podría causar debilidad a la albañilería. Sin

embargo los esfuerzos de compresión a los que están sujetos los muros reales de albañilería para edificios de 5 pisos, son pequeños (en promedio $2\text{kg/cm}^2/\text{piso}$).

3.2.2 Concreto de Reparación

El concreto utilizado para reparar los elementos estructurales del muro, fue diseñado para alcanzar una resistencia de $f'c = 210\text{kg/cm}^2$, se utilizó cemento Portland Tipo I, arena gruesa y piedra chancada. La preparación fue hecha en una mezcladora de 7p^3 de capacidad, con la mano de obra proporcionada por el Laboratorio de Estructuras.

a) Ensayo de compresión

Se prepararon tres (03) probetas (Fig. 3.7) con el concreto utilizado en las reparaciones, para poder controlar su calidad. Luego las probetas fueron curadas en la poza de agua durante una semana y fueron ensayadas a compresión simple siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C-39 (Fig. 3.8).



Fig. 3.7 Probetas de concreto provenientes del concreto utilizado en la reparación de las columnas.

La tabla 3.6 muestra los resultados obtenidos para el ensayo a compresión de las probetas. En ella podemos observar que la resistencia promedio sobrepasa en 28% la resistencia de diseño, y tiene una dispersión de apenas 2.1%, por lo cual se espera un óptimo desempeño a los 28 días.

Tabla 3.6

Resultados de ensayos a compresión simple del concreto

Probeta	Dm (cm)	Área (cm ²)	Carga máx. (Ton)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Desv. Esf. (kg/cm ²)	Prom. Esf. (kg/cm ²)	Dispersión
P1	15.76	195.08	53.41	273.79	5.58	268.59	2.1%
P2	15.77	195.32	52.60	269.30			
P3	15.40	186.27	48.93	262.69			

No se realizó prueba de slump, porque el concreto mostró una buena trabajabilidad, además no tuvo mucha manipulación porque luego de la preparación se descargó en un bugui y fue vaciado directamente en la columna al mismo tiempo que se iba realizando el proceso de compactación, con una vibradora de aguja.



Fig. 3.8 Ensayo a compresión simple de las probetas de concreto.

3.2.3 Puente de adherencia SikaDur 32Gel

La resina epóxica SikaDur 32Gel, se usó como adhesivo estructural entre el concreto fresco de reparación y el concreto endurecido del muro construido, también se le aplicó con una brocha a las varillas de acero de las columnas existentes, para lograr una mejor adherencia durante el vaciado.

a) Preparación

La resina epóxica viene en 2 recipientes distintos; ambos contienen agentes reactantes; la forma de preparación es muy simple y consiste en mezclar ambos agentes en uno de los dos recipientes, sin embargo debe tenerse cuidado al hacer la mezcla porque la reacción genera bastante calor y se realiza de forma rápida, y en caso de no aplicarse en menos de 15 minutos la mezcla endurecerá, quedando inutilizable.

b) Aplicación

Previamente a su aplicación se debe limpiar la zona de contacto entre el concreto nuevo con el concreto antiguo y el acero, luego se aplica la mezcla preparada con una brocha de pintar de tres pulgadas. El concreto nuevo (concreto de reparación) debe ser vaciado máximo hasta dentro de las 3 horas de aplicado el epóxico.



Fig. 3.9 Presentación del epóxico SikaDur 32Gel.

3.2.4 Varilla de polímero reforzado con fibra de vidrio GFRP

a) Concepto

Las varillas de refuerzo GFRP (Fig. 3.10) son elementos compuestos de fibras de vidrio impregnadas de resina y que no contienen acero, son inmunes al ataque de cloruros y de químicos. Además, las varillas de refuerzo no son conductoras de electricidad. Tienen una resistencia a la tensión mayor que la del refuerzo de acero convencional llegando a ser el doble dependiendo del diámetro, y pesan la cuarta parte. Debido a que las varillas de refuerzo GFRP no son conductoras, no afectan los campos magnéticos ni las frecuencias de radio, por tal motivo son el refuerzo ideal para concreto utilizado en ambientes que contienen equipos con imagen de resonancia magnética, equipos de radio y de calibración de brújulas, o transformadores de alto voltaje, cables y subestaciones. Aparte, son resistentes a la corrosión, por lo que pueden tener poco recubrimiento.



Fig. 3.10 Varilla de GFRP (glass-fiber-reinforced-polymer).

b) Proceso de fabricación

Las varillas de GFRP están hechas con hilos de fibra de vidrio, que se ponen bajo tensión y son impregnados con una resina termofraguante, de manera tal de lograr que las fibras se mantengan todas juntas y se comporten como si constituyeran un elemento único. A este proceso se le denomina pultrusión; para aumentar su capacidad de adhesión, la parte exterior de las barras es deformada y revestida con arena de grano grueso [Ref. 3].

c) Características

Las varillas de fibra de vidrio usadas en la investigación tienen un contenido de fibras de aproximadamente el 60% de material compuesto. El diámetro utilizado fue de $\frac{1}{4}$ " (6.25mm) y el ensayo de tracción realizado proporcionó una resistencia a tracción de 827 Mpa (8.435kg/cm²) con un módulo de elasticidad de 40.7 MPa (415kg/cm²).

La información obtenida de los ensayos [Ref. 3] concuerda casi al 100% con las características generales de las varillas de GFRP que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 3.7

Características físicas de las varillas de GFRP (Ref. 3)

Diam. (mm)	Diam. Nominal (mm)	Sección Transversal (mm ²)	Resist. a la tracción (Mpa)	Módulo de elasticidad (Mpa)
6	6.35	31.67	830	40.80
9	9.53	71.26	760	40.80
12	12.70	126.68	690	40.80
16	15.88	197.93	655	40.80
19	19.05	285.02	620	40.80
22	22.23	387.95	585	40.80
25	25.40	506.71	550	40.80
28	28.58	641.30	520	40.80
32	31.75	791.93	480	40.80

*Fuente: Fortius, BK Internacional

d) Ventajas principales de las varillas GFRP

- Resistentes a la corrosión: no se corroen cuando se encuentran en presencia de un gran número de sustancias agresivas; además, son inertes a los iones cloro, por tanto necesitan poco recubrimiento;
- Resistentes a los agentes químicos;
- Dotadas de una resistencia a la tracción superior a la del acero (hasta 2 veces más), y con un peso igual a la cuarta parte, pueden por lo tanto, ser transportadas y montadas sin necesidad de tener que utilizar grandes equipos de elevación; y
- Dimensionalmente estables en situaciones de sollicitación térmica normales: los efectos de dilatación y contracción son muy reducidos.

e) Desventajas de las varillas GFRP

- No se les puede doblar, aunque existe varillas especiales que pueden venir dobladas de fábrica; pero a un mayor costo.
- No son resistentes a los incendios.
- Al ser cortadas desprenden astillas de fibra de vidrio, exigiendo por lo tanto el uso de mascarillas de protección.

4. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

4.1 GENERALIDADES

Con la finalidad de determinar las propiedades de albañilería simple, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en prismas de albañilería. Esta información proviene de la referencia 2.

Para estos ensayos se construyeron tres pilas y cuatro muretes con ladrillos KK industrial y mortero 1:4 con juntas de espesor de 1.0cm para la unión de las unidades de albañilería.

De los ensayos se pudieron obtener las resistencias características a compresión de las pilas ($f'm$) y a compresión diagonal de los muretes ($v'm$).

4.2 RESULTADOS

Estos prismas tuvieron una falla frágil, presentándose trituración de los ladrillos en las pilas y falla por tracción diagonal en los muretes.

4.2.1 Pila de ladrillos

La resistencia característica a compresión axial de las pilas de 60cm de altura y 13cm de espesor (esbeltez 4.6) fue $f'm = 127.27\text{kg/cm}^2$, los resultados individuales aparecen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Resistencia a la compresión axial de las pilas

Muestra	Largo (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Carga (KN)	f_m (kg/cm ²)	Desv. (kg/cm ²)	Media (kg/cm ²)	$f' m$ (kg/cm ²)
PC1	23.60	12.60	297.36	452.00	154.95	16.68	143.95	127.27
PC2	23.65	12.55	296.81	443.00	152.15			
PC3	23.80	12.60	299.88	367.00	124.75			

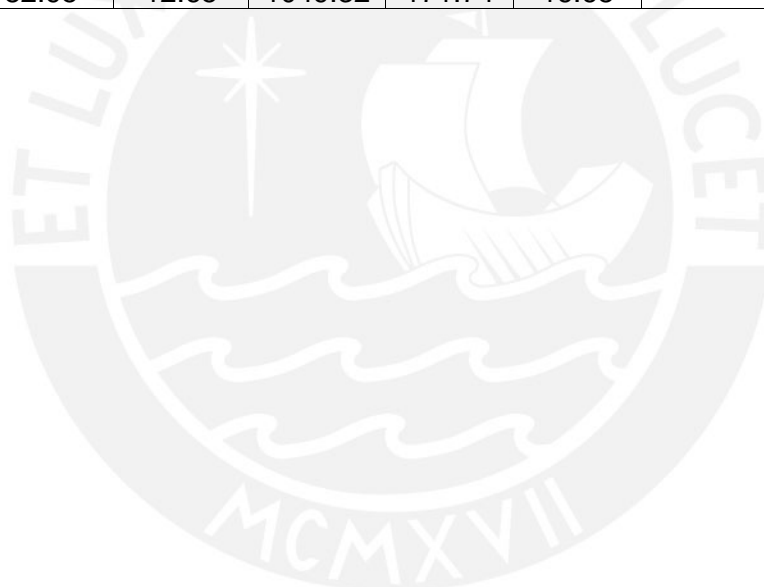
4.2.2 Muretes de ladrillo

Los muretes de ladrillo de 60x60cm con 13cm de espesor tuvieron una resistencia a compresión diagonal de $v'm = 16.02 \text{ kg/cm}^2$, los resultados individuales aparecen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2

Resistencia a la compresión diagonal de muretes de ladrillo

Muestra	Diagonal (cm)	Espesor (cm)	Área (cm ²)	Carga (KN)	v_m (kg/cm ²)	Desv. (kg/cm ²)	Media (kg/cm ²)	Prom $v'm$ (kg/cm ²)
MC1	82.75	12.70	1050.93	164.43	15.95	0.44	16.46	16.02
MC2	82.80	12.60	1043.28	171.39	16.75			
MC3	82.95	12.65	1049.32	171.74	16.68			



5. MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

La información correspondiente a este capítulo proviene de la referencia 2.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL ESPECIMEN

El muro de albañilería confinada (Fig. 5.1) fue construido para ser ensayado mediante carga lateral hasta alcanzar la falla. La mano de obra para la construcción del muro, estuvo a cargo del personal de Laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica del Perú.

Las dimensiones del muro fueron 2.40 x 2.40 x 0.13m, y no se colocó ningún refuerzo horizontal, considerándose únicamente mechas de acero de 6mm cada 3 hiladas para conectar la albañilería con las columnas, debido a que esta conexión fue al ras. Para su construcción se emplearon unidades de albañilería KK industrial en aparejo de soga con un espesor de 13.0 cm, el espesor de la junta de mortero, de proporción 1:4, fue de 1.0 cm. Los elementos de concreto se diseñaron con una resistencia de $f'_c = 210\text{kg/cm}^2$.

- **Columnas**

Para la construcción de las columnas se consideró un elemento de sección 24.0cm x 13.0cm, quedando al ras de la albañilería, el refuerzo empleado fue:

4 ϕ 1/2" con estribos de ϕ 1/4" 1 @ 5, 4 @ 10cm, resto @ 25cm.

- **Viga solera**

En la parte superior del muro se colocó una viga solera para confinar conjuntamente con las columnas a las unidades de albañilería, el refuerzo utilizado fue:

4 ϕ 3/8" con estribos de ϕ 1/4" 1 @ 5, 4 @ 10cm, resto @ 25cm.

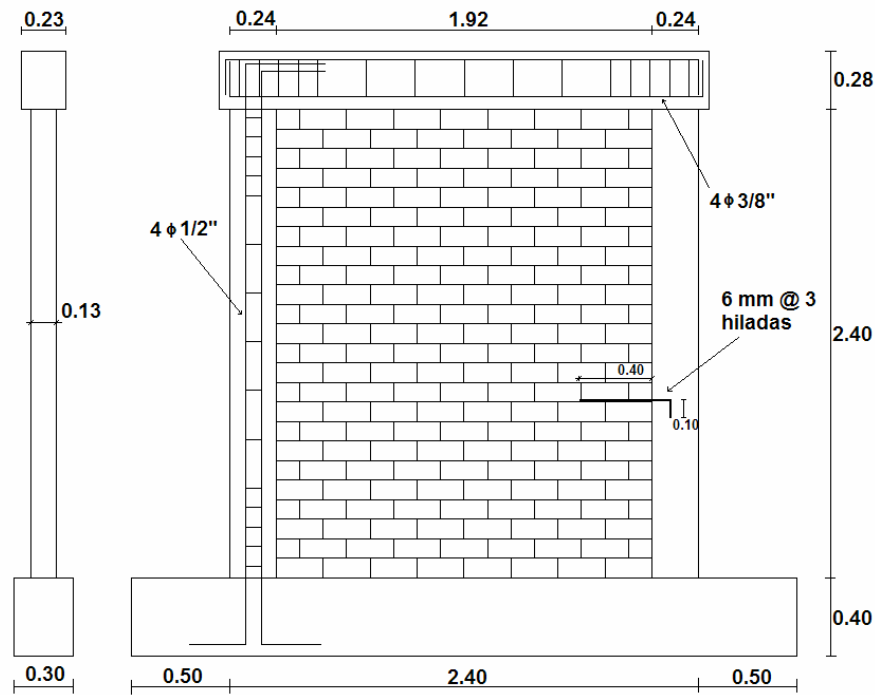


Fig. 5.1 Características geométricas del muro de albañilería confinada.
(Dimensiones en metros).

5.2 PROCESO CONSTRUCTIVO

a) Cimentación y acero de columnas

Primero el personal del laboratorio habilitó y armó todo el acero de la viga de cimentación y de las columnas; posteriormente se realizó el encofrado de la viga de cimentación, procediéndose luego al vaciado y vibrado del concreto.

Luego de una semana, se desencofró la viga sin encontrarse cangrejeras ni presencia de burbujas de aire.

b) Asentado de las unidades de albañilería

Una vez desencofrada la viga de cimentación, y luego de asegurar los estribos de las columnas (Fig. 5.2), se procedió al asentado de los ladrillos, mediante la utilización de un tira línea, un cordel, un badilejo, fraguador, un nivel de mano, y una plomada. Estos ladrillos fueron regados durante media hora la tarde anterior al asentado.



Fig. 5.2 Los estribos de la columna fueron colocados y ajustados antes del levantamiento de la albañilería.

Primero se marcó la zona de contacto entre la cimentación y el muro, con el tira línea, para luego proceder a la colocación de la primera capa de mortero, luego se procedió al asentado propiamente dicho de toda la fila de ladrillos dejando un espesor de 1.0 como junta vertical entre las unidades de albañilería; estos espacios son rellenos luego con mortero, utilizando el fraguador como ayuda para su colocación, así como para retirar el material sobrante (Fig. 5.3)



Fig. 5.3 Asentado de ladrillos; relleno de juntas verticales con mortero de proporción 1:4 (cemento: arena).

Continuando con la segunda hilada, se procedió a asentar y aplomar un ladrillo en ambos extremos del muro (ladrillo maestro), y un cordel colocado al ras del mismo fue utilizado como guía para el asentado de las demás unidades de albañilería (Fig. 5.4).



Fig. 5.4 Asentado de ladrillos, puede notarse el ladrillo maestro y el cordel.

Este mismo proceso se continuó para las hiladas restantes, cuidando de colocar las mechas de anclaje cada 3 hiladas (Fig. 5.5). La albañilería fue construida en 2 jornadas de trabajo, cuidando que la junta de construcción localizada a la mitad de la altura, estuviese limpia y humedecida antes de iniciar la segunda jornada.



Fig. 5.5 (Arriba) Durante la construcción del muro de albañilería se utilizó mechas de 6mm, ubicadas en ambos lados del muro cada 3 hiladas. (Abajo) Albañilería terminada al ras en su conexión con las columnas.



c) Vaciado de columnas

Una vez culminado el levantamiento del muro (Fig. 5.5), se encofraron las columnas y se remojaron las zonas de contacto entre la futura columna y el muro, para que éste no le quite agua al concreto de las columnas durante la fragua. Después se procedió con el vaciado del concreto preparado en una mezcladora de 7p³.

Durante el proceso de vaciado se fue vibrando el concreto con una vibradora de aguja para evitar que se formen cangrejas o bolsas de aire. Para poder realizar el vaciado en toda la columna se habilitó un andamio de un cuerpo, que luego sirvió para los trabajos de la viga solera.

d) Viga solera

La armadura de la viga solera fue instalada un día después del desencofrado de las columnas (Fig. 5.6), y se procedió a su encofrado y vaciado siguiendo los pasos anteriormente utilizados para la viga de cimentación y las columnas.



Fig. 5.6 Armadura de viga solera lista para el encofrado.

6. ENSAYO DEL MURO ORIGINAL A CARGA LATERAL CÍCLICA

La información que se proporciona en este capítulo, proviene de la referencia 2.

6.1 GENERALIDADES

El ensayo de carga lateral cíclica consiste en aplicarle al muro una fuerza mediante un actuador dinámico, con el fin de registrar los desplazamientos y grietas generadas por la aplicación de la fuerza (Fig. 6.1). La fuerza se aplica en fases que tienen un límite de desplazamiento previamente designado, y cada fase se divide en ciclos de carga positiva y negativa hasta que el lazo histerético Cortante-Desplazamiento se establezca.

Los datos de fuerza aplicada y de desplazamientos son registrados durante todo el ensayo y llevados a un computador mediante distintos sistemas electrónicos, para luego poder procesar la información.

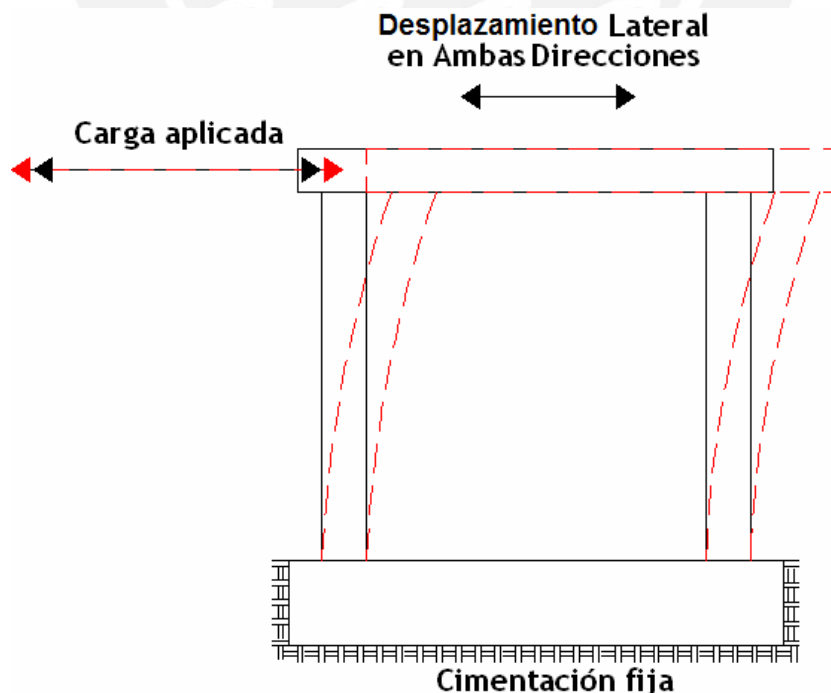


Fig. 6.1 Esquema de un ensayo de Carga Lateral Cíclica.

6.2 INSTRUMENTACIÓN

La carga lateral cíclica fue aplicada en la viga solera mediante el actuador dinámico; para la lectura de los datos correspondientes a los desplazamientos, se utilizaron transductores electrónicos (LVDT) y para el registro de la carga lateral asociados a estos desplazamientos se utilizó una celda de carga de 500 KN. Los instrumentos fueron conectados a un amplificador (Fig. 6.2), que se encarga de mandar la señal amplificada en forma de puntos tabulados hacia la computadora mediante el software LabView, luego estos puntos son grabados en un formato compatible con cualquier hoja de cálculo para poder analizarlos en el computador.



Fig. 6.2 Amplificador de señal.

El esquema de los dispositivos colocados en el muro se presenta en la Fig. 6.3, donde además se muestra el punto de acción del actuador y el sistema de fijación del muro. Las funciones de los LVDT fueron:

- D1: Medir los desplazamientos laterales;
- D2 y D3: Medir el trabajo del refuerzo vertical existente en las columnas;
- D4 y D5: Medir el posible desplazamiento del muro respecto a la cimentación.

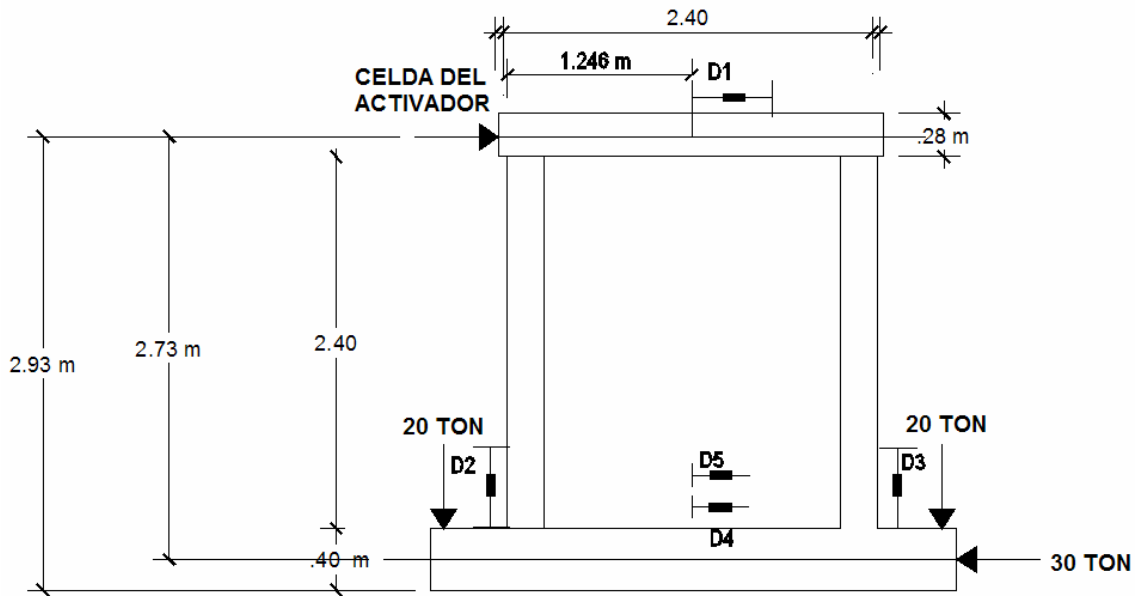


Fig. 6.3 Esquema de la Instrumentación utilizada.

6.3 MONTAJE DEL MURO

El muro fue instalado con la ayuda de un puente grúa, movilizándolo desde el patio en donde fue construido hasta la zona de ensayo; luego se procedió a fijar la viga de cimentación mediante la utilización de tres gatas hidráulicas. Se utilizó una gata horizontal de 30 toneladas para evitar un posible deslizamiento durante el ensayo, y dos gatas verticales de 20 toneladas cada una para evitar el volcamiento.

Posteriormente se fijaron con pegamento a la superficie del muro los transductores electrónicos (LVDT) como se aprecia en la figura 6.4.



Fig. 6.4 Los LVDT se fijaron al muro según el esquema de la Fig. 6.3.

Se dispuso también de dos tirantes horizontales colocados a la altura de la viga solera (Fig.6.5), con la finalidad de poder desplazar al muro en el sentido negativo mediante el actuador dinámico, los dos tirantes se sujetaron a unos cabezales metálicos. Luego de ser colocados, fueron probados aplicando una carga, y una vez verificado el correcto funcionamiento se ajustaron y se procedió a calibrar los LVDT.



Fig. 6.5 Tirantes horizontales colocados a la altura de de la viga solera.

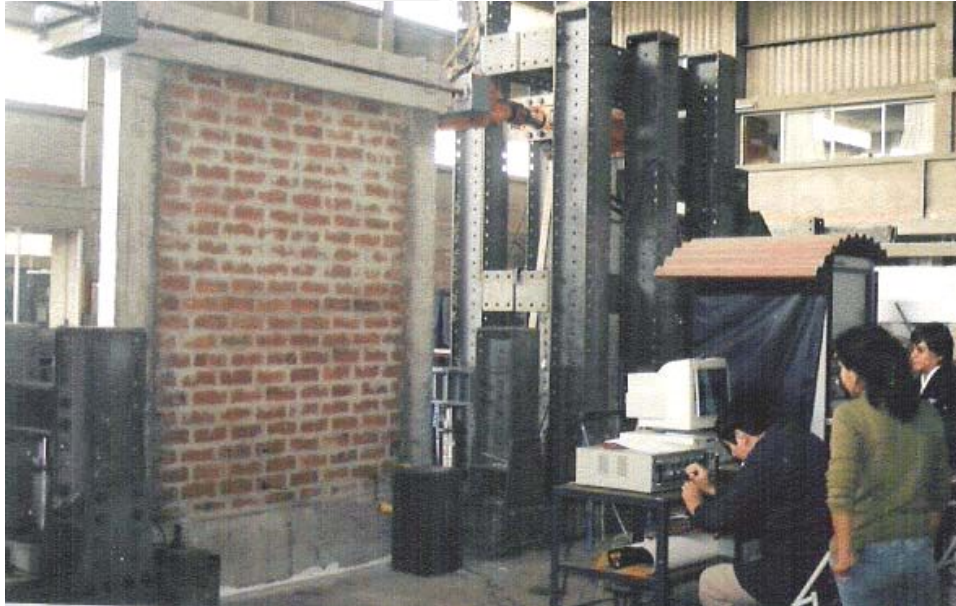


Fig. 6.6 Momentos previos al ensayo, luego del montaje del muro y de la revisión de los instrumentos de medición y del sistema de cómputo.

6.4 ENSAYO DEL MURO DE ALBAÑILERÍA

El muro se ensayó a carga lateral cíclica controlándose el desplazamiento horizontal en 10 fases subdivididas a su vez en distintos ciclos según se indica en la tabla 6.1, hasta alcanzar un desplazamiento de 20.0 mm. La cantidad de ciclos en cada fase fue considerada con la finalidad de poder estabilizar el lazo histerético generado en el gráfico Fuerza Cortante vs. Desplazamiento.

La velocidad empleada fue la convencional para la mayoría de ensayos de carga lateral cíclica en muros de albañilería, desarrollándose 1 ciclo cada 4 minutos.

Tabla 6.1

Fases del Ensayo De Carga Lateral Cíclica

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D(mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Ciclos	1	1	2	2	3	2	2	3	3	3

Para poder distinguir mejor las grietas, y que estas queden registradas según la fase en donde ocurrieron, se utilizó crayolas de diferentes colores, un color para cada fase.

7. RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MURO ORIGINAL

La información numérica proveniente del ensayo ha sido tomada de la referencia 2, mientras que el procesamiento de resultados fue elaborado por el tesista.

Al iniciar el ensayo, se detectó un problema con la carga aplicada, lo cual no permitió la correcta lectura de los datos, invalidando la etapa elástica del ensayo; a pesar de este hecho se optó por continuar el ensayo en el mismo archivo de datos, previo ajuste de los instrumentos, y se consideró que posteriormente se podría descartar la data errónea.

Se presenta los resultados del ensayo de carga lateral cíclica, analizando el comportamiento del muro en el rango elástico, la formación de la primera fisura por flexión, el punto de rotura diagonal, la capacidad máxima de resistencia y el desplazamiento lateral.

7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FALLAS DURANTE EL ENSAYO

Como era de esperarse, en la primera fase ($D = 0.5\text{mm}$) ni la siguiente ($D = 1.0\text{mm}$), presentaron fisura alguna, al encontrarse ambas dentro del rango elástico.

El primer punto importante que se presentó durante el ensayo, ocurrió en el primer ciclo de la Fase 3 ($D = 2.5\text{mm}$), generando un desplazamiento $D1$ de 1.6mm , y fisuras de hasta 0.4mm de espesor en las zonas de las columnas, esta primera fisura por flexión marcó el ingreso del desplazamiento del muro a la zona inelástica. Continuando con el ensayo, en la fase 4 ($D = 5.0\text{mm}$), se empezó a observar grietas escalonadas en la mitad inferior de la albañilería, alcanzando aberturas de hasta 2.5mm , tal y como se puede apreciar en la figura 7.1



Fig. 7.1 Durante la Fase 4 ($D = 5.0\text{mm}$) se puede apreciar claramente el inicio de las grietas escalonadas en el muro, luego de haberse presentado las primeras fisuras por flexión en la fase 3 ($D = 2.5\text{mm}$).

Al someter al muro a las fases 5 ($D = 7.5\text{mm}$), 6 ($D = 10\text{mm}$) y 7 ($D = 12.5\text{ mm}$), lo más relevante fue que las grietas de las columnas fueron agrandándose hasta un grosor máximo de aproximadamente 6mm en la base de la columna derecha, mostrando además, el aumento de la grieta diagonal en ambas caras del muro, como se puede apreciar en las figuras 7.2 y 7.3.

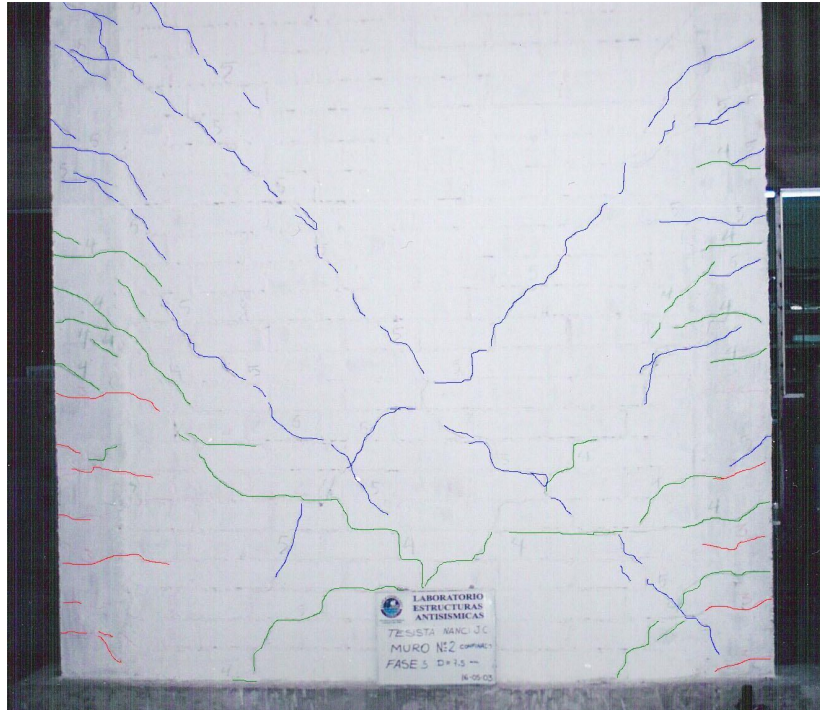


Fig. 7.2 En la figura se puede apreciar con color azul, las grietas que se empezaron a formar durante la fase 5 ($D = 7.5\text{mm}$) con grietas de hasta 3mm.



Fig. 7.3 Vista de la parte posterior del muro luego de la Fase 6 ($D= 10\text{mm}$). Se puede apreciar la grieta diagonal del muro con tamaños de hasta 5mm, la grieta ha sido pintada en la foto con color verde para poder apreciarla mejor.

La trituración de las unidades de albañilería y grietas de hasta 8mm de espesor se dio durante el primer ciclo de la fase 8 ($D = 15.0 \text{ mm}$) a la altura superior del muro, siguiendo una de las diagonales claramente visibles y que con el transcurrir del movimiento fue marcándose cada vez más. También pudo notarse el inicio de la trituración de la base derecha de la columna del muro (Fig. 7.4)



Fig. 7.4 Fase 8 ($D = 15\text{mm}$), inicio de la trituración de las unidades de albañilería, notoria presencia de una de las grietas diagonales, e inicio de la trituración de la base de la columna derecha.

La carga máxima ($P_{\text{máx}} = 21.39 \text{ Ton}$) se alcanzó durante la ejecución del primer ciclo de la fase 9 ($D = 17.5 \text{ mm}$), y las grietas llegaron a ser de hasta 15mm de grosor. Durante esta fase además la grieta diagonal se propagó por la parte superior de la columna izquierda (Fig. 7.5).

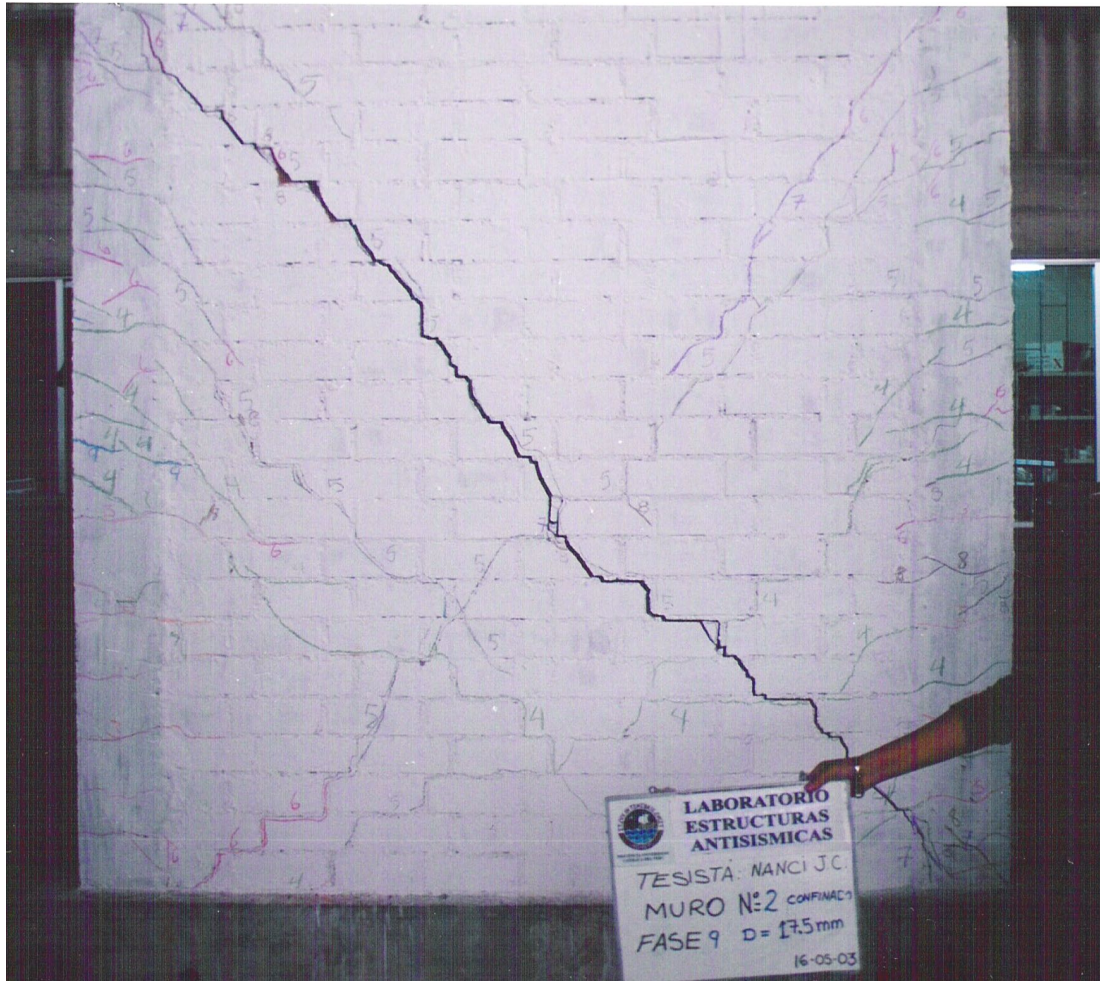


Fig. 7.5 Fase 9 ($D = 17.5 \text{ mm}$) la grieta diagonal se propagó por la parte superior de la columna izquierda, al mismo tiempo que continuó ocurriendo la trituration de las unidades de albañilería.

Finalmente se sometió al muro a la fase 10 ($D = 20.0 \text{ mm}$), observándose en la figura 7.6, la trituration de la parte central del muro, y el incremento del grosor de la fisura diagonal principal que tuvo un tamaño de 18mm.

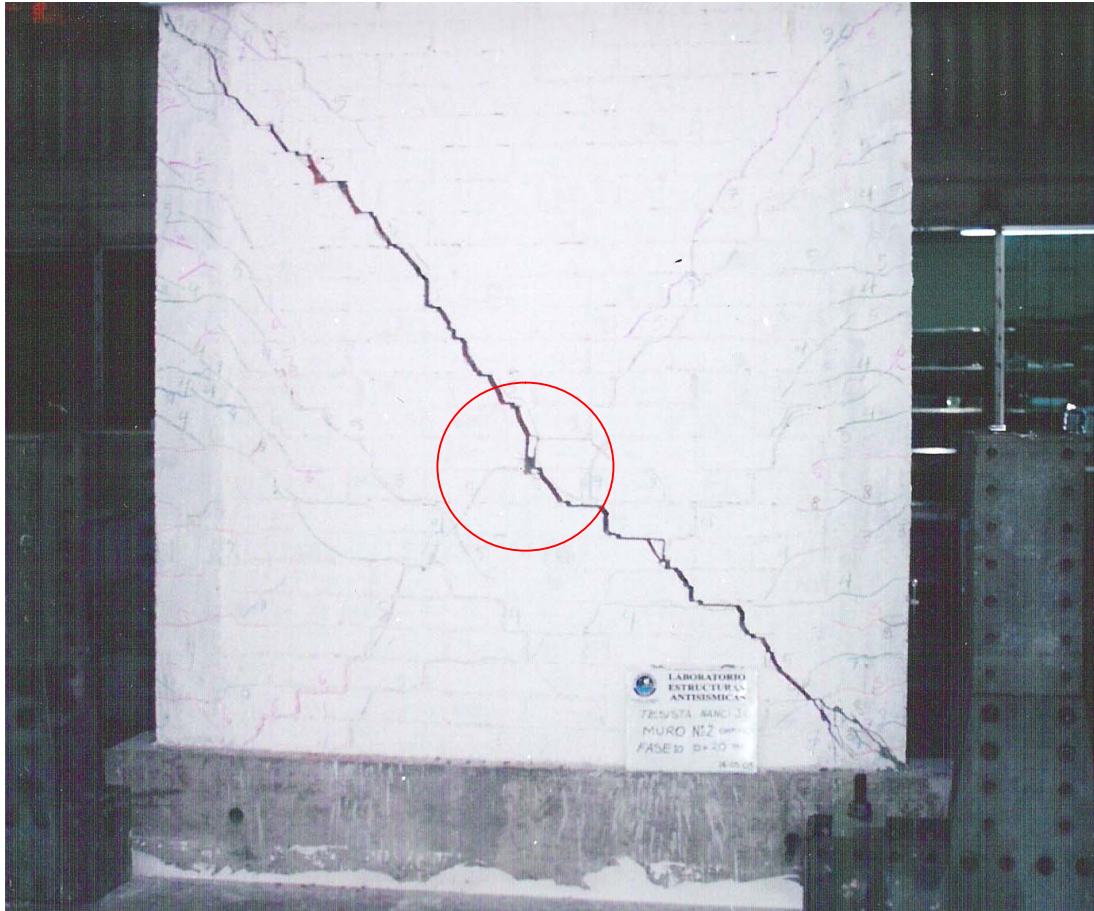


Fig. 7.6 La unidad central del muro, encerrada en el círculo, quedó triturada y la diagonal principal formada luego alcanzó un tamaño de abertura de hasta 18mm en el momento de culminado el empuje.

En general, se determinó que el muro tuvo una falla por corte.

7.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MURO

El muro presenta un comportamiento elástico durante la primera fase del ensayo, y la rigidez lateral inicial K_0 esta definida como la fuerza (F) que genera un desplazamiento unitario (δ).

El gráfico 7.1 presenta la variación del Desplazamiento vs. La Carga lateral en la fase del ensayo. La rigidez lateral inicial corresponde a la pendiente de la rama positiva del ciclo 1, obteniéndose $K_0 = 8.12 \text{ ton/mm}$.

Analíticamente la rigidez lateral puede calcularse mediante la siguiente expresión, correspondiente a un muro en voladizo.

$$K_0 = \frac{E}{h^3 / 3I + fh (E/G) / A}$$

Donde:

- E = módulo de elasticidad;
- h = altura hasta el eje del actuador;
- I = inercia de la sección transformada;
- f = factor de forma (A_{axial}/A_{alma});
- G = módulo de corte;
- A = área de corte.

Para poder aplicar la fórmula teórica es necesario utilizar la sección de un elemento homogéneo en sus características, por eso en el caso de albañilería confinada donde se tiene 2 materiales integrados, (concreto armado y albañilería), es necesario aplicar el criterio de la sección transformada (Fig. 7.7).

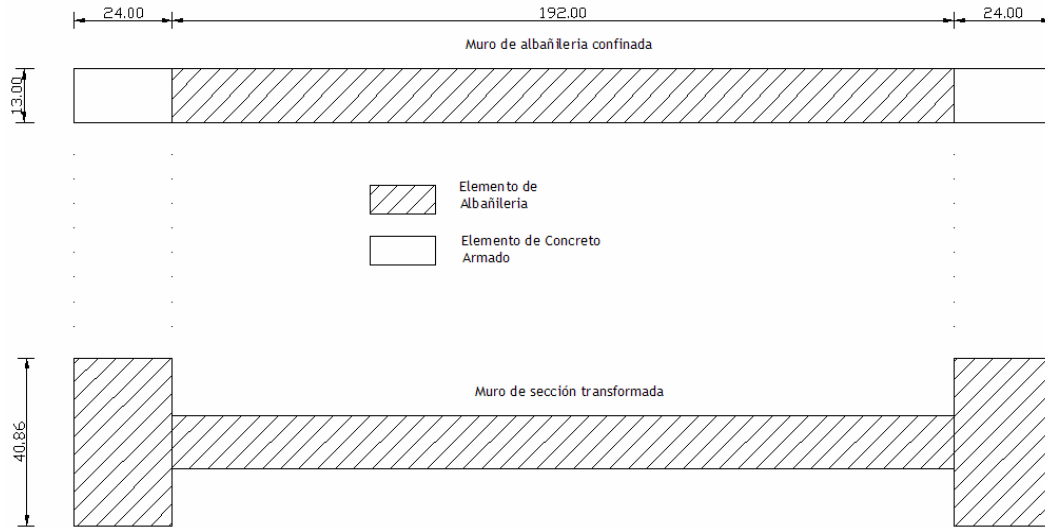


Fig. 7.7 Aplicación del criterio de la sección transformada.

Datos:

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Área	A	4.46 E+03	cm ²
Inercia del elemento	I	3.06 E+11	mm ⁴
Factor de forma	f	1.43	
Altura	h	254	cm
Módulo de elasticidad del concreto	E _c	2.00 E+05	kg/cm ²
Resistencia de la albañilería	f' m	127.27	kg/cm ²
Módulo de elasticidad de la albañilería	E _a	6.36 E+04	kg/cm ²
Relación de módulos elásticos	n = E _c /E _a	3.14	
Módulo de corte *	E _a /G _a = 2.5 --> G _a	2.54 E+04	kg/cm ²

(*) Nota: los valores de E_a = 500f'm y E_a/G_a = 2.5, son tomados de la Norma E-070 (Ref. 4).

La rigidez lateral inicial K_o teórica resultó 16.67 ton/mm, valor que duplicó al resultado experimental de 8.12 ton/mm. Esta diferencia se debió a los problemas en la toma de datos al empezar el ensayo.

7.3 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN

Durante un ensayo de carga lateral cíclica, la aparición de una fisura en el concreto indica el fin de la etapa elástica. En el ensayo, la primera fisura por flexión se presentó en el primer ciclo de la fase 3, con una carga lateral asociada de 10.28 ton y un desplazamiento $D = 1.60$ mm, como se puede apreciar en el gráfico 7.2.

Con interés comparativo se calculó de forma teórica la resistencia a tracción por flexión ($F'r$), teniendo en cuenta que la aparición de la primera fisura se dio en el talón de la columna derecha.

La fórmula empleada fue:

$$F'r = \frac{V \times H \times y}{I}$$

Donde:

V = carga lateral en el instante que se produce la fisura;

H = altura desde la fisura hasta el eje del actuador;

I = inercia de la sección transformada;

y = distancia desde el centro de gravedad hasta la fibra extrema en tracción.

Datos:

Descripción	Símbolo	Cantidad	Unidad
Carga lateral	V	10.28	Ton
Altura desde la fisura hasta el eje del actuador	H	250	cm
Inercia	I	3.06 E+11	mm ⁴
Fibra extrema en tracción	y	120	cm

El resultado teórico fue 10.06 kg/cm^2 para la sección equivalente de albañilería, transformando esta resistencia a concreto $10.08 \times E_c/E_a$ se obtiene 31.65 kg/cm^2 , valor que resulta ser 9% mayor a la resistencia del concreto a tracción por flexión $29 \text{ kg/cm}^2 (2\sqrt{f'c})$.

7.4 AGRIETAMIENTO DIAGONAL

Durante el primer ciclo de la fase 5, hubo una degradación de la resistencia que se puede apreciar en el gráfico. 7.3, en forma escalonada y que marca el límite máximo de la resistencia al corte de la albañilería, que poco a poco se va recuperando gracias a los elementos de confinamiento, luego de liberar energía en forma de grietas diagonales.

La carga lateral que causó el agrietamiento diagonal fue de 17.94 ton asociada a un desplazamiento de $D = 5.35\text{mm}$, y una distorsión de $1/450$, que es 78% mayor que la distorsión teórica propuesta de $1/800$ $D=3.0\text{mm}$, en este caso [Ref. 5]. Por otro lado, en la Norma E-070 [Ref. 4] se indica que la resistencia al agrietamiento diagonal para muros sin carga vertical se calcula con la fórmula:

$$V_m = 0.5 \times v'_m \times \alpha \times (L) \times (T)$$

Donde:

V_m = resistencia al agrietamiento lateral;

v'_m = resistencia característica a acorte de la albañilería;

α = factor de reducción de resistencia al corte por efectos de esbeltez;

T = espesor efectivo del muro; y

L = longitud total del muro.

Para muros con esbeltez 1 ($\alpha=1$), donde además $v'_m \leq \sqrt{f'_m}$, puesto que $v'_m = 16 \text{ kg/cm}^2$ es mayor a $\sqrt{127} = 11.27 \text{ kg/cm}^2$, entonces la resistencia teórica será $V_m = (0.5) \times (11.27) \times (240) \times (13) = 17.58 \text{ Ton}$, y este valor concuerda con el valor hallado experimentalmente.

7.5 CARGAS Y DESPLAZAMIENTOS

Se presenta a continuación los valores de carga lateral máxima y sus correspondientes desplazamientos medidos durante el ensayo. La tabla 7.1 contiene los datos del empuje del muro con el actuador y representa al primer ciclo de cada fase del ensayo. En la tabla 7.2 aparecen los datos del ciclo estable de cada fase, es decir cuando el actuador se contrae y jala al muro por acción de los tirantes horizontales colocados en la viga solera (Fig. 6.5), aquí los transductores electrónicos (LVDT) registran desplazamientos tanto negativos como positivos dependiendo de la ubicación del LVDT, para efectos de poder construir una curva desplazamiento vs. Carga lateral máxima (envolvente), se han tomado los datos como positivos en todos los casos.

Tabla 7.1

Carga lateral máxima y desplazamientos asociados correspondientes al ciclo 1 de cada fase (empujando)

Fase	V(Ton)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)
1	4.55	0.56	-0.18	0.11	0.00	-0.04
2	7.69	1.01	-0.34	0.17	-0.03	-0.05
3	14.88	2.61	-0.84	0.27	-0.21	-0.20
4	17.75	4.94	-1.35	0.36	-0.50	-0.48
5	19.01	6.41	-1.55	0.43	-0.57	-0.64
6	19.37	9.93	-1.77	0.50	-0.24	-0.28
7	20.81	12.58	-2.34	0.58	-0.31	-0.33
8	21.15	14.86	-3.08	0.34	-0.34	-0.36
9	21.39	17.30	-3.90	-0.26	-0.37	-0.39
10	19.67	19.48	-3.99	-1.30	-0.36	-0.32

Tabla 7.2

Carga Lateral máxima y Desplazamientos asociados correspondientes al ciclo estable de cada fase (jalando)

Fase	V(Ton)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)
1	-4.12	-0.53	0.12	-0.14	0.07	0.04
2	-8.33	-0.99	0.21	-0.26	0.14	0.07
3	-11.69	-2.45	0.33	-0.79	0.42	0.25
4	-16.96	-4.76	0.44	-1.55	0.98	0.55
5	-18.12	-7.51	0.52	-2.34	1.39	0.68
6	-17.66	-10.02	0.59	-2.33	1.04	0.54
7	-18.61	-12.17	0.46	-2.93	1.13	0.61
8	-19.07	-15.16	0.19	-4.21	1.18	0.69
9	-18.83	-16.86	-0.17	-5.05	1.14	0.66
10	-19.26	-19.60	-0.11	-6.91	1.25	0.69

Para ver el comportamiento del muro durante todo el ensayo, disponemos del gráfico 7.4 que muestra las curvas de Desplazamiento lateral vs. Carga lateral aplicada, estas curvas son llamadas Lazos Histeréticos, y entre otras cosas nos ayudan a observar incursiones en el rango inelástico, caídas de resistencia y disipación de energía.

7.6 CAPACIDAD RESISTENTE MÁXIMA DEL MURO

La capacidad máxima es el límite de la fuerza que puede soportar el muro sin degradar resistencia. Con el dato de la carga lateral máxima de cada fase y su desplazamiento asociado en D1, de la tabla 7.1 y 7.2 se elaboró el gráfico 7.5. El punto más alto de la curva corresponde a una carga de 21.39 ton y un desplazamiento $D = 17.30\text{mm}$, éste ocurrió en el ciclo 1 de la fase 9 en la rama positiva presentando una distorsión de $1/140$, que es 44% mayor a la distorsión del límite de reparación de $1/200$ [Ref. 4]



8. REPARACIÓN DEL MURO DE ALBAÑILERÍA

8.1 GENERALIDADES

Luego de haber sido ensayado el muro y de presentar falla por corte, tal y como se esperaría en un muro típico de alguna edificación existente, se procedió a repararlo para tratar de recuperar su rigidez inicial y su capacidad máxima resistente.

La reparación del muro fue llevada a cabo en el patio de construcción del Laboratorio de Estructuras (Fig. 8.1).



Fig. 8.1 Muro de albañilería original, antes de la reparación.

8.2 TÉCNICA DE REPARACIÓN

La técnica de reparación consistió en reforzar por corte al muro con varillas de fibra de vidrio (GFRP) cubiertas con una capa de mortero 1:4, colocadas en forma horizontal cada 2 hiladas intercalando el refuerzo en ambas caras del muro (Fig. 8.2) para balancear el refuerzo.

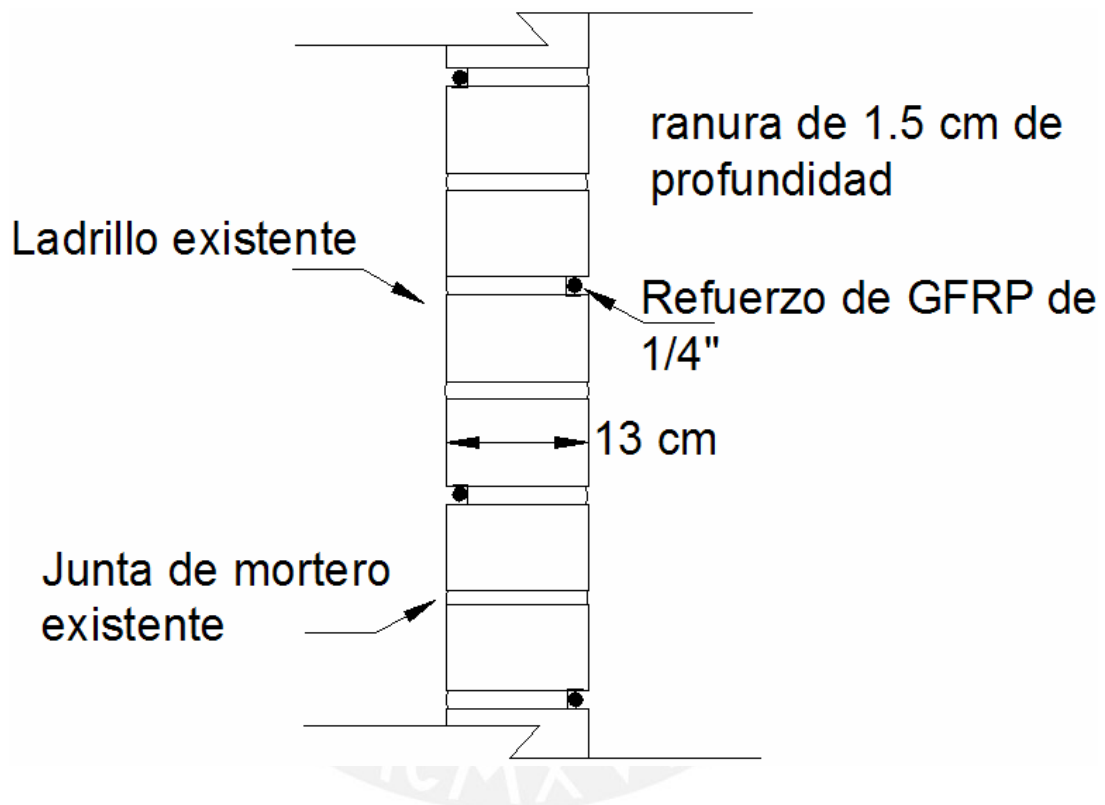


Fig. 8.2 Esquema de colocación de refuerzos de fibra de vidrio GFRP. Sección vertical del muro.

8.2.1 Procedimiento

a) Separación de las varillas

Para el cálculo de las distancias entre los refuerzos horizontales, se recurrió a la fórmula para hallar el área del refuerzo horizontal (A_{sh}), especificada en la Norma E-070 [Ref. 4]:

$$A_{sh} = \frac{V_m S}{f_y D}$$

Donde:

S = espaciamiento del refuerzo horizontal ≤ 40 cm.

D = L, altura de muro (240 cm)

f_y = 8,400 kg/cm² para refuerzo de GFRP. (Ver acápite 3.2.4)

V_m = fuerza cortante máxima del muro ensayado, estimado en 25 Ton
(Ver acápite 7.6)

A_{sh} = área transversal del refuerzo, 0.32 cm² (1/4")

El resultado obtenido fue $S = 25.8$ cm, lo cual determinó que se optara por una separación de 20cm (cada 2 hiladas). Este cálculo solo se utilizó como referencia para obtener una separación aproximada, pues cuenta con variables asumidas, como por ejemplo: la magnitud de la fuerza cortante ($V_m = 25,000$ kg), así como el diámetro real de la varilla que debido a su superficie arenosa en muchos casos fue de $\phi 5/16$ ".

b) Picado de la zona dañada en las columnas

El primer paso realizado una vez definida la separación de las varillas fue el picado de la zona de las columnas donde se presentaron fisuras grandes (Fig. 8.3), estas fueron propagaciones de la fisura diagonal en la albañilería. Las herramientas utilizadas fueron comba y cincel para el picado y un compresor de aire para la limpieza de la zona (Fig.8.4).



Fig. 8.3 Detalle de la trituración del concreto debida a la falla por corte del muro.



Fig. 8.4 Picado del concreto con comba y cincel (Izq.); compresor de aire para limpieza de zona trabajada (Der.).

c) Ranurado de las juntas con amoladora

Para hacer el corte en las juntas de la albañilería en donde se iban a colocar las varillas se utilizó una amoladora (Fig. 8.5). Este proceso no demandó mano de obra muy calificada, ni tampoco mucho tiempo para su ejecución en ambas caras del muro. Debe mencionarse que las varillas de refuerzo GFRP no estuvieron ancladas a las columnas y que la profundidad de las ranuras fue de 1.5cm.



Fig. 8.5

Preparación de la ranura para alojar las varillas de refuerzo; se utilizó una amoladora y un andamio para alcanzar las juntas altas.

d) Reparación de las fisuras gruesas en la albañilería

Una vez realizados los cortes para alojar las varillas se procedió a picar las fisuras gruesas de la albañilería y que en su mayoría se encontraban en las diagonales del muro. Esta operación solo requirió de un operario con un martillo y cincel (Fig. 8.6). Posterior al picado se humedecieron las grietas del muro con agua y se procedió a su sellado con una mezcla de mortero 1:4 (Fig. 8.7). Las fisuras finas existentes en las columnas y la albañilería, no fueron resanadas.



Fig. 8.6 Picado de fisuras importantes en la albañilería. La profundidad es de aproximadamente 1.5 cm.



Fig. 8.7 Sellado de grietas con mortero 1:4.

e) Reparación de las columnas

Para la reparación de las columnas se utilizó concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y una resina epóxica (Sikadur 32Gel) que sirvió como puente de adherencia entre el concreto existente y el concreto nuevo.

Se empezó el trabajo de esta fase reemplazando en la zona picada los estribos de las columnas por estribos nuevos de acero corrugado convencional de diámetro $\frac{1}{4}$ ", debido a que los estribos originales se encontraban sueltos y ligeramente doblados. Luego de colocados los estribos, se empezó la preparación del concreto en una mezcladora (Fig. 8.8).



Fig. 8.8 Preparación de concreto para la reparación de las columnas.

Simultáneamente a la preparación del concreto para las columnas, se realizó la preparación de la resina epóxica SikaDur 32Gel según las especificaciones del envase, con el fin de obtener un puente de adherencia que permita la mejor unión entre el concreto existente y el concreto nuevo. Luego con ayuda de una brocha de 3" se pintó todas las zonas de contacto con el nuevo concreto, incluyendo los refuerzos de acero existentes en la columna, sus estribos y la albañilería. (Fig. 8.9).

Fig. 8.9

Aplicación del epóxico en las zonas de contacto con el concreto nuevo.



Después se procedió al encofrado de las columnas con madera, tarea que fue realizada por un solo operario en corto tiempo. Al terminar la preparación del concreto se tomaron muestras en tres (03) probetas con la finalidad de controlar las especificaciones de diseño. Estas probetas fueron curadas en la poza del laboratorio durante una semana (Fig.8.10).



Fig. 8.10 (Arriba) Preparación del encofrado en la zona de reparación de la columna. (Abajo) Probetas para controlar la resistencia del concreto de reparación.



Finalmente, el concreto se descargó en un bugui y fue llevado al pie del muro para ser distribuido en las zonas de reparación de ambas columnas. Para un correcto vaciado y una correcta consolidación del concreto se utilizó un vibrador (Fig. 8.11); pese a ello al día siguiente, cuando se desencofró la columna derecha, se encontró una cangrejera en la zona de contacto entre el concreto de la columna existente y el concreto utilizado en la reparación. Esta cangrejera fue reparada con mortero 1:3 mezclada con resina epóxica en polvo, no se utilizó concreto porque la zona era muy pequeña (Fig. 8.12)

Fig. 8.11
Vibrado del concreto de
reparación.





Fig. 8.12 Zona de la cangrejera. Su reparación se hizo con mortero y resina epóxica simple en polvo.

f) Reparación de la zona central de la albañilería

La zona central de la albañilería presentaba un ladrillo y medio triturados (Fig. 8.1). El reemplazo de estas unidades por unidades nuevas se descartó, pues no se iba a lograr una adecuada adherencia con los ladrillos existentes, además, el hueco a tapar era de dimensiones un poco más pequeñas que un ladrillo convencional, por tanto se vio por conveniente reparar esta zona solamente con mortero 1:3 con un contenido de resina epóxica en polvo equivalente al 2% del peso total de la mezcla.

Primero se procedió a quitar el ladrillo triturado y el mortero de las juntas con cincel y martillo, luego se limpió la zona y se remojó con agua para mejorar el agarre con el nuevo mortero. Como segundo paso, se tapó la parte posterior del muro con madera y un puntal diagonal fijado al piso (Fig. 8.13), para poder pañetear con el mortero por el otro lado del muro. Este proceso fue sencillo y solo se necesitó un operario y menos de media hora de trabajo.



Fig. 8.13 Encofrado de una de las caras del muro en la región central de la albañilería.

De igual forma que con el concreto, se prepararon probetas cúbicas del mortero de reparación en un molde de madera (Fig. 8.14).



Fig. 8.14 Preparación de cinco probetas cúbicas de 5cm de lado del mortero de reparación.

g) Colocación de refuerzos GFRP

El principal detalle de este método de reparación es la forma y cuidado en la colocación de los refuerzos de fibra de vidrio GFRP. En vista que estos refuerzos no están anclados en sus extremos, se debe dar énfasis a la profundidad de la cavidad donde serán instaladas, la cama de mortero donde reposarán y la capa de recubrimiento colocada una vez instaladas las varillas. La profundidad de la cavidad horizontal fue aproximadamente de 1.5cm (Fig. 8.5), una vez realizados los trabajos de reparación de albañilería se procedió a limpiar las ranuras horizontales con un compresor de aire, para luego humedecerlas con agua para lograr mejor adherencia con la cama de mortero a colocar. La capa colocada como cama para las varillas consistió en un mortero simple de proporciones 1:4 un poco más aguado de lo normal.



Fig. 8.15 Lanzamiento de mortero para crear la cama de asiento de la varilla (Izq.) e instalación de la varilla (Der.).

La forma de colocación fue muy sencilla, necesitándose solo de un operario con una batea que contenía la mezcla y un badilejo para lanzar el mortero hacia las cavidades (Fig. 8.15); la mezcla fue lanzada dos veces en un mismo lugar para lograr que el mortero penetre en la ranura y se adhiera a la albañilería. Una vez colocada la capa en la primera cavidad (parte inferior del muro), se instaló la varilla de refuerzo previamente limpiada con una tela seca. La varilla no contó con ningún tipo de fijación ni soporte dentro de la cavidad, solamente se requirió observar que repose en lo más profundo de la cama de mortero.

Instalada la varilla dentro de la ranura se procedió a recubrirla con el mismo mortero 1:4. Esta mezcla no fue tan aguada como la utilizada en la cama de apoyo, y fue colocada de la misma manera verificándose un acabado parejo a ras del muro. Una vez acabada la instalación de la primera varilla se procedió de la misma forma con las faltantes en la cara frontal y posteriormente con las de la cara posterior del muro (Fig. 8.16)



Fig. 8.16 Una vez instalada la varilla, se procedió a recubrirla con mortero 1:4 y a dejar un acabado al ras del muro de albañilería.

h) Reparación de fisuras en las columnas

Luego de un día de haberse instalado las varillas de refuerzo, se vio por conveniente reparar también las grietas más notorias de las columnas existentes. Estas grietas tenían grosores de 1.5mm en los casos más extremos y que en su mayoría se concentraban en la columna izquierda del muro.

Para dicha reparación primero se marcaron con tiza las grietas más notorias, luego con cincel y martillo se picaron un poco ensanchándolas con la finalidad de poder colocarle una mezcla que las selle. Luego de una limpieza con brocha de las zonas picadas y de humedecer la zona de contacto, se sellaron las grietas con una mezcla de mortero 1:3 y resina epóxica en polvo como puente de adherencia, en una cantidad igual al 2% del peso de la mezcla total. Para terminar este proceso se limpiaron los excedentes de mortero (Fig. 8.17).



Fig. 8.17 Reparación de grietas importantes en las columnas.



Fig. 8.18 Con un frotacho y un badilejo se procedió al sellado de las fisuras en las columnas.

Finalmente, un día después de sellar las fisuras en las columnas, se procedió a pintar la cara frontal del muro de albañilería con una base color blanco para poder marcar las fisuras que apareceran durante el ensayo de carga lateral cíclica (Fig. 8.19).



Fig. 8.19 Muro reparado antes del ensayo.

9. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA DEL MURO REPARADO

9.1 GENERALIDADES

El ensayo de carga lateral cíclica al que fue sometido el muro de albañilería reparado, se realizó mediante el mismo procedimiento usado para el muro original.

9.2 INSTRUMENTACIÓN

Los dispositivos electrónicos de medición colocados en el muro tuvieron la misma ubicación que en el ensayo en el muro original (Fig. 6.3), esto con motivos de poder realizar una comparación efectiva entre los resultados de ambos ensayos.

La instrumentación utilizada permitió medir:

- La carga lateral aplicada al muro.
- Los desplazamientos verticales relativos entre las columnas y la cimentación mediante los LVDT D2 y D3.
- El posible deslizamiento del muro sobre la cimentación con los LVDT D4, D5.

9.3 MONTAJE DEL MURO

Con la ayuda del puente grúa se realizó el traslado del muro desde el patio en donde se efectuaron las reparaciones hasta la zona de ensayo, luego se procedió al anclado de la cimentación (Fig. 9.1) del muro mediante tres gatas hidráulicas, este proceso fue el mismo que se utilizó en el muro original.

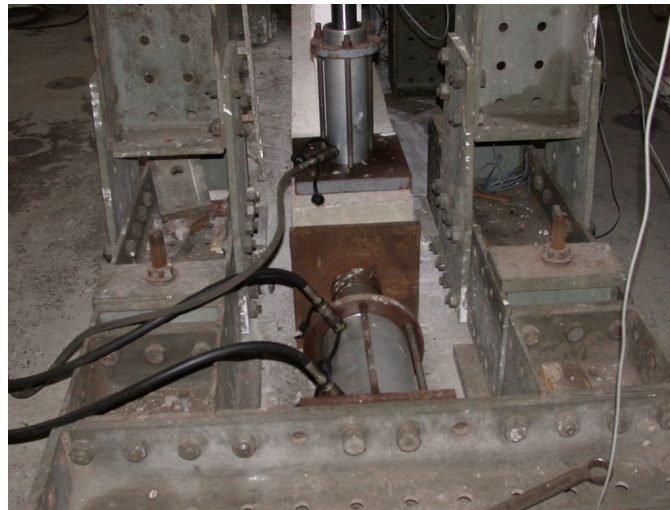


Fig. 9.1 Se muestra la gata hidráulica horizontal y la vertical para evitar el deslizamiento y el volcamiento del conjunto.

El transductor electrónico (LVDT) D1 fue colocado en la superficie superior de la viga solera, D2 y D3 tuvieron su base en un lado de cada columnas, mientras que D4, D5 y D6 fueron colocados por la cara posterior del muro (Fig. 9.2). Luego se colocó el capping de yeso para la nivelación del muro.

*Fig. 9.2
Parte posterior del muro
en donde se colocó la
base para los LVDT D4,
D5 y D6.*



De manera semejante a lo realizado con el muro original, se dispuso de dos tirantes horizontales colocados a la altura de la viga solera (Fig.9.3), sujetos con cabezales metálicos que reaccionaban con el actuador. Una vez colocada la instrumentación y antes de ajustar los tirantes se aplicó una carga de 300kg y se procedió a ajustar los tirantes, luego se regresó la carga del actuador a 0 kg y los LVDT se graduaron en cero. Una vez realizada esta operación el muro quedó listo para el ensayo.



Fig. 9.3 Vista global de los dispositivos utilizados en el ensayo.

9.4 ENSAYO DEL MURO REPARADO

El muro se ensayó a carga lateral cíclica controlándose el desplazamiento horizontal D_1 en 10 fases, subdivididas a su vez en distintos ciclos según la tabla 9.1, hasta alcanzar un desplazamiento de 20.0 mm. Se utilizó la misma cantidad de fases con las que se ensayó el muro original [Ref. 2] con la finalidad de poder comparar los resultados y determinar si se pudo encontrar alguna mejora con este método de reparación. La cantidad de ciclos en cada fase varió

un poco con respecto al muro original, esto se hizo para poder estabilizar el lazo histerético Fuerza Cortante vs. Desplazamiento.

La velocidad empleada fue de 1 ciclo cada 4 minutos, quedando así definida cada rama del lazo histerético en 2 minutos para la rama positiva y 2 minutos para la negativa.

TABLA 9.1
Fases del Ensayo De Carga Lateral Cíclica

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D(mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Ciclos	1	2	2	2	3	2	2	3	3	3

Para poder distinguir mejor las grietas, y que estas queden registradas según la fase en donde ocurrieron, se utilizó crayolas de diferentes colores, un color para cada fase. Los colores se eligieron basados en los utilizados en el ensayo del muro original [Ref. 2]. Se prepararon también carteles que se colocaban en una pequeña pizarra acrílica al inicio de cada fase y que indicaban los principales datos de cada fase. Durante el ensayo se fue anotando los puntos principales y lo que le ocurría al muro, para poder luego buscar el instante en la computadora y obtener la fuerza y los desplazamientos correspondientes. En todo el proceso se iba verificando que los tirantes de la viga solera no se aflojen, ni que las gatas hidráulicas varíen su fuerza de aplicación.

10.RESULTADOS DEL ENSAYO DEL MURO REPARADO

Se presenta los resultados del ensayo de carga lateral cíclica del muro reparado. Se analiza, al igual que para el muro original, el comportamiento en el rango elástico, la formación de la primera fisura por flexión, el punto de rotura diagonal y la capacidad resistente máxima.

10.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FALLAS DURANTE EL ENSAYO

La primera fase ($D = 0.5\text{mm}$) transcurrió sin que se pueda visualizar algún tipo de grieta. Fue en el primer ciclo de la fase 2 ($D = 1.0\text{mm}$) donde se pudieron observar fisuras en la albañilería que alcanzaban un grosor máximo de 0.20mm de espesor y que se presentaron en forma escalonada en la parte central del muro, desde el encuentro con las columnas hasta aproximadamente las tres primeras hileras de ladrillos.

Las primeras fisuras por flexión se presentaron durante la fase 3 ($D = 2.5\text{mm}$), dispersas en ambas columnas con grosores de 0.50mm y acompañadas de un aumento de grietas diagonales y escalonadas en la albañilería (Fig. 10.1). Se observó también la aparición de una fisura horizontal en la unión de la columna reparada de la derecha y la cimentación, al llegar al segundo ciclo de esta fase se presentó una fisura en la base de la otra columna (columna izquierda), además en la parte superior de la columna izquierda, donde también se realizaron reparaciones, aun no se observaban grietas.



Fig. 10.1 Primeras fisuras por flexión, se pueden apreciar en ambas columnas (Fase 3, $D = 2.5\text{mm}$).

La fase 4 ($D = 5.00\text{mm}$) incrementó notablemente el número de fisuras por flexión, además se presentó la rotura diagonal ante una fuerza aplicada de aproximadamente 10 Ton. Ambas grietas diagonales siguieron el mismo camino dejado por las grietas diagonales del muro original, y se unían casi al centro del muro, en la zona donde se reemplazó el ladrillo por mortero 1:3 y epóxico en polvo (Fig. 8.13). En la fase 5, se originó una grieta importante en el talón de la columna reparada, alcanzando un grosor de 2.0mm y se presentó más o menos en la zona donde se cambiaron los estribos doblados del muro original. También se debe mencionar la posibilidad de que un mal vibrado del concreto de reparación haya afectado la resistencia del concreto, además de la cangrejera que se originó durante la reparación. Las fisuras donde se hicieron resanes en la albañilería original, empezaron a notarse con mayor claridad y alcanzaron grosores de hasta 2.5mm, casi al terminar esta fase se presentó una nueva grieta, en la base de la columna derecha, también con un grosor promedio de 2.0mm.



Fig. 10.2 Fase 4. Formación de la grieta diagonal.

Durante toda la fase 6 ($D = 10\text{mm}$) solo se apreció el incremento de las grietas formadas en las fases anteriores, tanto en el muro como en las columnas. Las grietas se presentaban por corte, pero en su mayoría se formaron por un debilitamiento de la albañilería y de la junta de mortero que ya habían soportado grandes desplazamientos en el ensayo de carga lateral cíclica previo. Se puede decir, que hasta finalizar esta etapa, las varillas de refuerzo GFRP pudieron controlar la aparición de nuevas fisuras por corte. Recién en la fase 7 ($D = 12.5\text{mm}$) se pudo distinguir nuevas fisuras en la albañilería que no estaban directamente relacionadas al ensayo del muro original, estas fisuras se presentaron alcanzando grosores de hasta 4.5mm , mientras que las grietas anteriores alcanzaron grosores de hasta 7.0mm , todo esto para una distorsión mucho mayor al límite de reparación $1/200$ [Ref. 4]. También se fisuró la junta entre las columnas y la viga solera. Finalizada esta etapa observamos fisuras en la diagonal que permitían ver las varillas de refuerzo GFRP (Fig. 10.3).

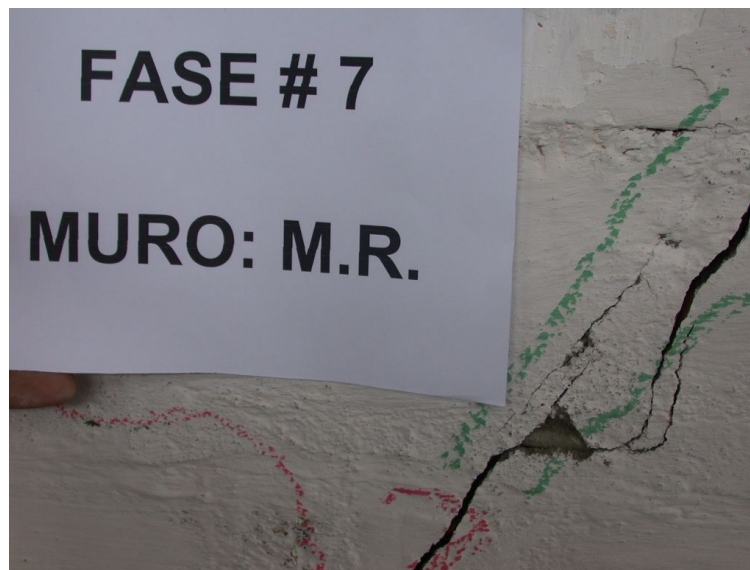
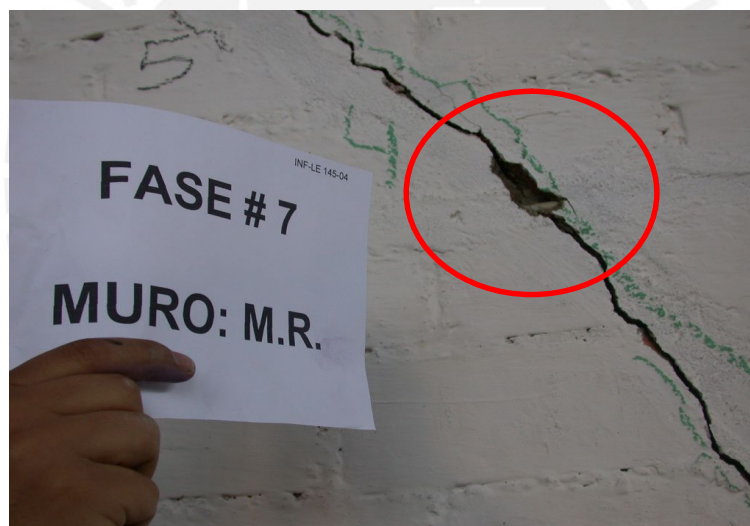


Fig. 10.3 Fase 7, $D = 12.5\text{mm}$, se pueden observar en distintas partes de las diagonales principales las varillas de refuerzo de GFRP.



En la fase 8 ($D = 15.0\text{mm}$) la fisura diagonal se marca desde un extremo del muro al otro, y en toda su extensión el espesor alcanza un promedio de 8.5mm , además aparece un escalón en la zona central de la diagonal en donde se reparó con mortero (Fig. 10.4 Arriba.). Por la parte posterior del muro apareció una grieta horizontal en la junta donde se alojó una varilla central del muro, exponiéndola en más de 10cm (Fig. 10.4 Abajo).

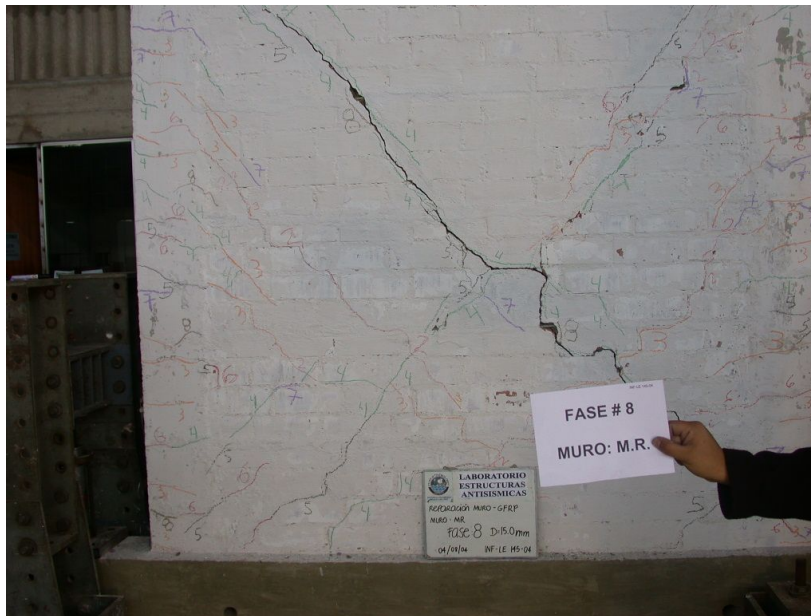


Fig. 10.4 Diagonal principal con un escalón en la zona central del muro (arriba). Grieta en la cara posterior del muro donde queda completamente visible la varilla de GFRP (abajo).



Un crujido en la fase 8 advirtió que se estaba empezando a triturar el talón del muro. En la fase 9 (17.5mm) las fisuras alcanzaron grosores de hasta 10mm, y un nuevo crujido señaló el inicio del trituramiento del talón derecho. En ese momento empezó el pandeo de las varillas de refuerzo GFRP pudiendo observarse a simple vista en distintos puntos del muro (Fig. 10.5).

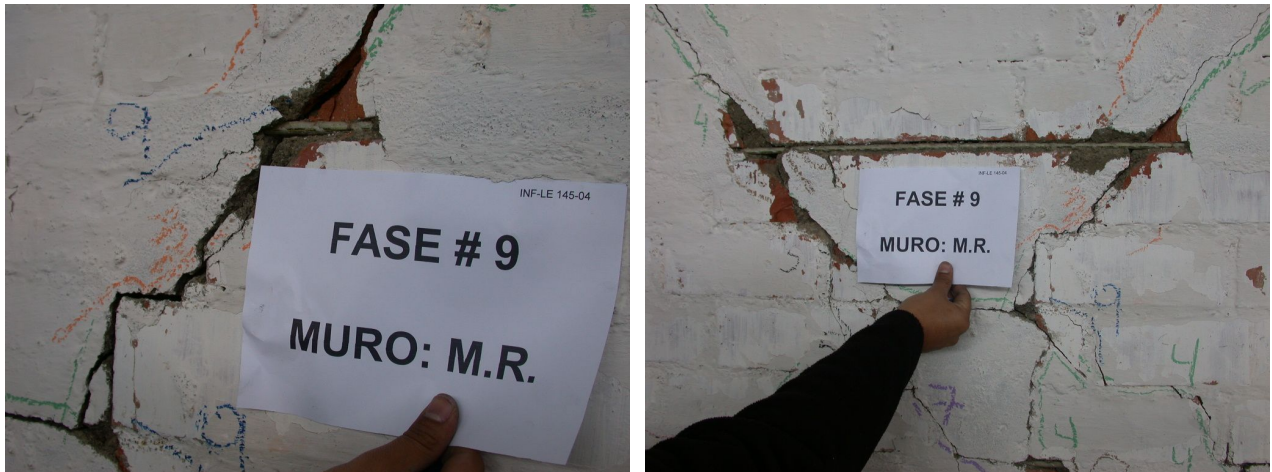


Fig. 10.5 Fase 9, $D = 17.5\text{mm}$, las varillas de refuerzo GFRP pandearon y ya no pueden controlar los esfuerzos de corte en el muro.

En la fase 10 ($D = 20.0\text{mm}$) las grietas alcanzaron grosores de 13mm , y se trituró la parte central del muro (Fig. 10.6), además debido al pandeo de las varillas de GFRP se perdió la adherencia con la cama de mortero en distintas zonas del muro (Fig. 10.7). Finalmente se sometió al muro a un movimiento armónico con frecuencia de 2Hz y desplazamientos de 10mm . Las grietas se abrían y cerraban con el movimiento y las varillas GFRP ubicadas en la zona central del muro se deslizaron libres en su eje sin ninguna adherencia con la cama de mortero.



Fig. 10.6 Trituración de ladrillos en la fase 10, $D = 20.0\text{mm}$.



Fig. 10.7 La adherencia entre las varillas de GFRP y la cama de mortero se perdió en distintas zonas del muro.

La conclusión del ensayo es que el muro en un inicio empezó a fallar por flexión y las varillas GFRP pudieron brindar soporte contra nuevas grietas diagonales, luego la falla por corte se hizo mucho más evidente debido en gran medida a que las varillas GFRP empezaron a perder adherencia con el mortero, y el muro terminó con una marcada falla por corte.



Fig. 10.8 Muro reparado después del ensayo.

10.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTICO DEL MURO

Experimentalmente la rigidez lateral inicial K_0 fue de 5.90 ton/mm, para poder obtener este valor se utilizó la pendiente de la rama positiva del primer ciclo de la fase 1, como se puede observar en el gráfico. 10.1.

10.3 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN

De la misma manera que en el ensayo del muro original, se pudo registrar la aparición de la primera fisura en el concreto de la columna (gráfico 10.2), señalándose de esta forma el fin de la etapa elástica. La primera fisura por flexión se presentó en el primer ciclo de la fase 3 (Fig. 10.9), con una carga lateral de 8.13 ton y un desplazamiento $D = 2.50\text{mm}$. La fisura se presentó en la base de la columna derecha, tal como ocurrió en el muro original, luego, las demás fisuras aparecieron en la zona central de ambas columnas.



Fig. 10.9 Fase 3. Fisuras por flexión en el muro reparado.

10.4 AGRIETAMIENTO DIAGONAL

Durante el primer ciclo de la fase 4, hubo una degradación de la resistencia lateral (gráfico 10.3) que poco a poco se fue recuperando gracias a los elementos de confinamiento y al trabajo de las varillas de GFRP. Esta caída de resistencia estuvo asociada a un agrietamiento diagonal importante en el muro (Fig. 10.10) y que marca el límite máximo de la resistencia al corte proporcionado por la albañilería. La carga lateral que causó el agrietamiento diagonal fue de 10.0 ton con un desplazamiento asociado $D = 3.6\text{mm}$, y una distorsión de $1/670$, que es 20% mayor que la distorsión teórica propuesta de $1/800$ [Ref. 5].

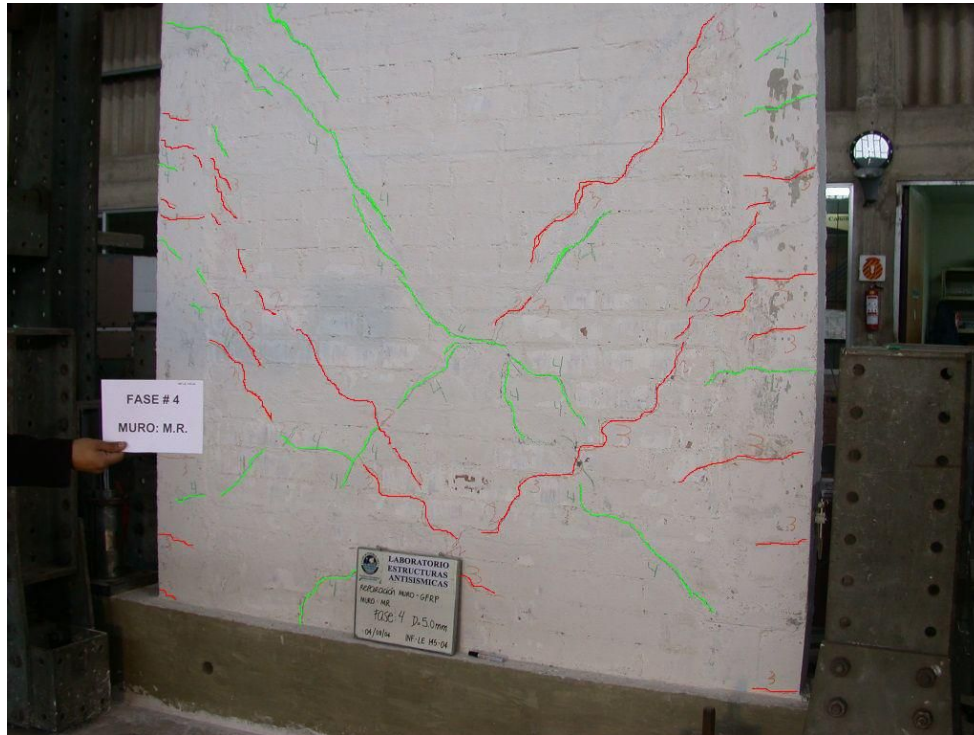


Fig. 10.10 Fase 4. Agrietamiento Diagonal.

10.5 CARGAS Y DESPLAZAMIENTOS

Se presenta a continuación los valores de carga lateral máxima y sus correspondientes desplazamientos medidos durante el ensayo. La tabla 10.1 contiene los datos del empuje del muro con el actuador y representa al primer ciclo de cada fase del ensayo. En la tabla 10.2 aparecen los datos del ciclo estable de cada fase, es decir cuando el actuador se contrae y jala al muro. Los transductores electrónicos (LVDT) registran desplazamientos tanto negativos como positivos dependiendo de su ubicación y del sentido de la carga, para efectos de poder construir la curva desplazamiento vs. Carga lateral máxima, se han tomado los datos como positivos en todos los casos.

Tabla 10.1

Carga lateral máxima y desplazamientos asociados correspondientes al ciclo 1 de cada fase (empujando)

Fase	V(Ton)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)	D6(mm)
1	2.86	0.51	-0.13	0.04	-0.04	-0.06	0.01
2	4.32	1.01	-0.24	0.08	-0.08	-0.09	-0.06
3	8.23	2.54	-0.57	0.17	-0.28	-0.28	-0.19
4	11.70	5.02	-0.92	0.33	-0.41	-0.42	-0.95
5	15.08	7.53	-1.31	0.44	-0.49	-0.53	-1.82
6	18.03	9.96	-1.73	0.54	-0.53	-0.66	-2.69
7	21.19	12.55	-2.26	0.65	-0.51	-0.69	-3.64
8	22.11	14.72	-2.80	0.46	-0.51	-0.75	-4.62
9	21.76	17.23	-3.10	-0.05	-0.43	-0.68	-7.09
10	20.81	19.90	-3.50	-0.75	-0.27	-0.60	-9.78

Tabla 10.2

Carga Lateral máxima y Desplazamientos asociados correspondientes I ciclo estable de cada fase (jalando)

Fase	V(Ton)	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)	D6(mm)
1	-2.57	-0.50	0.11	-0.07	0.03	0.06	-0.02
2	-4.05	-1.04	0.18	-0.16	0.09	0.17	-0.03
3	-6.76	-2.52	0.32	-0.49	0.24	0.57	-0.29
4	-10.44	-5.04	0.50	-0.99	0.54	1.16	-1.04
5	-13.61	-7.51	0.62	-1.46	0.80	1.43	-1.84
6	-16.63	-9.97	0.71	-1.99	1.08	1.70	-2.38
7	-18.95	-12.42	0.77	-2.77	1.49	2.14	-2.97
8	-19.43	-14.06	0.69	-3.57	1.77	2.37	-3.55
9	-19.45	-17.09	0.70	-4.90	2.30	2.87	-4.76
10	-19.39	-19.33	0.60	-5.72	2.61	3.41	-6.74

En el gráfico 10.4 aparecen los lazos histeréticos cortante vs. Desplazamiento que nos ayudan a observar las incursiones en el rango inelástico, las caídas de resistencia y la disipación de energía. En la fase 3, donde el lazo se ensancha considerablemente en la rama negativa, empieza la disipación de energía en forma de fisuras por flexión y diagonales en la albañilería. En el lazo de la fase 4 puede observarse una caída abrupta en la curva casi llegando al pico de la fuerza, este instante corresponde al límite máximo de resistencia al corte proporcionado por la albañilería, luego de la caída se puede notar que la curva recupera poco a poco su forma hasta llegar al pico, esto indica que los elementos de confinamiento y los refuerzos horizontales de GFRP proporcionaron resistencia al corte. Esta caída se repite también en la rama negativa de la misma

fase, pero su efecto no es tan marcado porque ahora la energía se disipa ensanchando las grietas diagonales existentes. Como resultado de esta degradación de resistencia, se observa que los Lazos Histeréticos se ensanchan paulatinamente conforme se avanza con el ensayo, así podemos ver que los desplazamientos remanentes llegan al orden de los 5mm en la fase final. Experimentalmente este comportamiento se presentó como trituración de los talones, de los ladrillos de la zona central y como pandeo de los refuerzos horizontales GFRP.

10.6 CAPACIDAD RESISTENTE MÁXIMA DEL MURO

La capacidad máxima es el límite de la fuerza que puede soportar el muro sin degradar resistencia. Con el dato de la carga lateral máxima de cada fase y su desplazamiento asociado en D1 de la tabla 10.1 se elaboró el gráfico 10.5 correspondiente a la envolvente Carga lateral máxima vs. Desplazamiento. El punto más alto de la curva corresponde a una carga de 22.11 ton y un desplazamiento $D = 14.72\text{mm}$, este ocurrió en el ciclo 1 de la fase 8 en la rama positiva presentando una distorsión de 1/160.

11. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MUROS

11.1 RIGIDEZ LATERAL

Durante el ensayo de carga lateral cíclica del muro original [Ref. 2] se presentaron algunos problemas técnicos que ocasionaron que los datos de las 2 primeras fases no se pudieran tomar correctamente, es por esta razón que la rigidez lateral inicial del muro (K_0) obtenida, no es confiable. Sin embargo, se ha utilizado el valor obtenido para compararlo con la rigidez inicial del muro reparado

Tabla 11.1
Comparación de Rigidez Lateral

Espécimen	K_0 (Ton/mm)	K_{final} (Ton/mm)
Muro original	8.12	1.01
Muro reparado	5.90	1.05

Basados en los resultados obtenidos experimentalmente podríamos decir que el muro reparado recuperó el 73% de la rigidez inicial elástica del muro original. Esta diferencia se atribuye a que las fisuras finas que tenía el muro original no fueron reparadas.

Comparando la rigidez final con la que terminó el muro original y la rigidez obtenida luego de la reparación, se puede apreciar que hubo un incremento de rigidez de casi 6 veces, con esta técnica sencilla de reparación.

Para poder comparar la variación que tiene la rigidez de ambos estados del muro, se presenta el gráfico 11.1, donde se puede observar que inicialmente y hasta la fase 4 los valores de rigidez difieren fuertemente, pero a partir de la fase 6, no hay mayor diferencia entre ambas rigideces, porque ambos ya cruzaron el límite de resistencia al corte y a partir de ese punto se presentan grietas similares.

11.2 PRIMERA FISURA POR FLEXIÓN

Los resultados obtenidos de la fuerza que produjo la primera fisura por flexión en ambos muros son presentados en la Tabla 11.2, así como la fase en que ocurrieron, ambos para distorsiones del orden del 0.1%.

Tabla 11.2

Fuerza Cortante necesaria para la primera fisura por flexión

Espécimen	V (Ton)	Fase
Muro original	10.30	3
Muro reparado	8.13	3

La fuerza cortante necesaria para causar la fisura por flexión en el muro reparado es el 79% de la necesaria para el muro original, Esta diferencia se atribuye a que durante la reparación se presentó una cangrejera entre el concreto nuevo y el existente y al hecho que no se repararon las fisuras finas existentes en las columnas.

11.3 AGRIETAMIENTO DIAGONAL

La carga lateral que generó el agrietamiento diagonal en el muro reparado fue el 56% de la correspondiente al muro original (Tabla 11.3), esto se debió a que las fisuras pequeñas no fueron reparadas, aparte que un ladrillo y medio fue sustituido con mortero 1:3 en la zona central del muro y, a que todas las grietas diagonales solo fueron tapadas con mortero 1:4; en una profundidad de hasta 2.5cm a cada lado del muro, es decir, el tapado con mortero no abarcó toda la profundidad del muro.

Tabla 11.3

Fuerza cortante en el momento del agrietamiento diagonal

Espécimen	V (Ton)	Fase
Muro inicial	17.94	4
Muro reparado	10.00	4

11.4 CAPACIDAD MÁXIMA

Según se puede observar en el gráfico 11.2 correspondientes a las envolventes de carga lateral máxima de ambos muros, el muro reparado soportó una carga máxima de 22.11 ton en la fase 8 superando ligeramente en 3% la carga máxima de 21.39 ton soportado por el muro original en la fase 9. También en este gráfico puede notarse que la efectividad del refuerzo de GFRP, es importante a partir de la fase 7 del ensayo, después de haberse formado las grietas diagonales, a partir de esta fase el comportamiento del muro reparado superó al original.

11.5 TIPO DE FALLA

El muro original falló por corte, agrietándose fuertemente el concreto de la parte superior de la columna izquierda y de la parte inferior de la columna derecha, además presentó pandeo del refuerzo existente en la columna de la derecha y estribos que quedaron sueltos, lo que produjo una degradación de resistencia.

El muro reparado empezó fallando por flexión, con aparición de numerosas fisuras en las columnas y luego de la rotura diagonal, la falla predominante fue por corte, y en las fases finales se perdió la adherencia de las varillas de GFRP en la zona central del muro, razón por la cual, estas varillas no aportaron mayor resistencia.



Fig. 11.1 Muro Original (arriba) y Muros reparado (abajo), después del ensayo.



12. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

12.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN

Para poder evaluar la ventaja de este método de reparación de muros de albañilería confinada con refuerzos de GFRP, es necesario hacer una comparación de precios tanto para la construcción del muro de 2.4 x 2.4m como para su reparación. Los precios para la construcción del muro [Ref. 2] se presentan en la tabla 12.1, y se considera el costo de la demolición y eliminación de escombros, así como el tarrajeo de ambas caras del muro una vez culminado el trabajo de construcción, obteniéndose que el precio por metro cuadrado para la construcción de un nuevo muro es de S/. 128.45 nuevos soles.

Tabla 12.1

Precios considerados para le reposición de un nuevo muro de albañilería

Ítem	Descripción	Und	Metrado	P.U. (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Demolición de muro	m2	5.76	12.99	74.82
2	Eliminación de material	m3	1.05	68.80	72.12
3	Construcción de Muro	glb	1.00	456.50	456.50
4	Tarrajeo de albañilería	m2	11.52	11.84	136.40
Total					739.84

La Tabla 12.2 presenta los precios para la reparación del muro confinado disgregado por materiales utilizados. De esta tabla, se obtiene el costo total de materiales, correspondiente a S/. 274.55 nuevos soles.

Tabla 12.2

Precios de materiales y herramientas para la reparación del muro

Ítem	Descripción	Und	Metrado	P.U. (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Cemento	bls	2.00	17.00	34.00
2	Arena fina	m3	0.10	16.10	1.61
3	Arena Gruesa	m3	0.20	16.95	3.39
4	Piedra chancada	m3	0.25	35.00	8.75
5	Resina Epóxica Sikadur 32 Gel	Kit	1.00	65.20	65.20
6	Varilla de Gfrp (3ml) (*)	und	12.00	2.10	25.20
7	Tarrajeo de albañilería	m2	11.52	11.84	136.40
Total					274.55

* Precio proporcionado por el Laboratorio de Estructuras de la Pucp.

Para la mano de obra, se considera el trabajo realizado por un (01) operario, con un costo unitario de S/. 11.88 nuevos soles por hora de trabajo. El tiempo necesario para los trabajos de reparación del muro se presentan en la Tabla 12.3 y suman un total de 6 horas hombre.

Tabla 12.32

Mano de obra para la reparación del muro

Ítem	Descripción	Und	Metrado	P.U. (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Picado de zona de reparación en columnas	hh	1.0	11.88	11.88
2	Picado de fisuras y ladrillo	hh	1.0	11.88	11.88
3	Corte con amoladora	hh	1.0	11.88	11.88
4	Reparación del concreto de columnas	hh	1.0	11.88	11.88
5	Relleno de fisuras y ladrillo triturado	hh	0.5	11.88	5.94
6	Colocación de varillas	hh	0.5	11.88	5.94
7	Reparación de fisuras finas en columnas	hh	1.0	11.88	11.88
				Total	71.28

Finalmente sumando los precios de materiales y de mano de obra, se obtiene un costo total de S/. 345.83 nuevos soles para la reparación del muro, siendo el precio por metro cuadrado de S/. 60.04 nuevos soles.

12.2 COMPARACIÓN DE COSTOS

Comparando se observa que el costo de reparación por metro cuadrado es 46.7% del costo de construcción de un muro nuevo, por tanto se convierte en una alternativa de reparación viable y fácil de implementar; aunque el efecto de carga vertical no ha sido incluido en lo analizado con este ensayo podemos concluir que tiene una buena relación costo – beneficio. Además debemos considerar que el costo de construcción de un nuevo muro se elevaría si se considera la adaptación del muro nuevo al sistema estructural existente. Debido a la sencillez de este método de reparación, los propios habitantes de la casa afectada podrían encargarse de las reparaciones, siempre y cuando exista algún tipo de capacitación o dirección técnica.

13. CONCLUSIONES

13.1 CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ El muro original fue sometido a distorsiones de hasta 0.008, lo que superó el límite de reparación (0.005), especificado por la Norma Técnica E-070, quedando con los talones de las columnas trituradas y con el refuerzo vertical pandeado. De este modo, la técnica de reparación implementada no fue lo suficientemente efectiva en lograr recuperar la rigidez inicial y la resistencia al agrietamiento diagonal.
- ❖ La rigidez lateral inicial y la resistencia al agrietamiento diagonal recuperada en el muro reparado fue el 73% y el 56% del muro original, respectivamente, esto se debe al hecho de no reparar la totalidad de las fisuras presentes en la albañilería y en las columnas, porque resultaría un proceso muy costoso y técnicamente imposible por la cantidad de fisuras existentes.
- ❖ La técnica de reparación hizo que se recupere más de 6 veces la rigidez con la que terminó el muro original luego del ensayo de carga lateral al que fue sometido. Por lo tanto se vuelve una técnica efectiva para aumentar rigidez.
- ❖ La fisura en los elementos de concreto se presentaron tanto para el muro original como para el muro reparado, para distorsiones del orden de 0.1%, la carga necesaria para ocasionar las fisuras en el muro reparado fue el 79% de la carga correspondiente al muro original. Se recomienda tener esto en cuenta en los diseños de reparación de muros.
- ❖ La capacidad de carga lateral máxima del muro pudo recuperarse mediante esta sencilla técnica de reparación. Esto se debe a que las varillas de GFRP trabajaron después del agrietamiento diagonal del muro reparado.
- ❖ Luego de alcanzado el punto de rotura diagonal, no existió variación en la rigidez de ambos estados del muro, debido a que el patrón de grietas fue similar. Lo que sí se pudo observar, es que las grietas deflexión localizadas en la base del muro reparado llegaron a ser cinco (05) veces mayor que las

del muro original, lo que indica una tendencia a la falla por flexión para el caso del muro reparado.

- ❖ La técnica de reparación es muy fácil de aplicar por personas sin mucha experiencia en la construcción, solo es necesario algún tipo de capacitación. Además llega a ser una buena opción para edificaciones de uso común debido al bajo costo en comparación a la construcción de un nuevo muro.
- ❖ Se puede apreciar a simple vista en el muro, que las fisuras diagonales fueron de menor grosor en el muro reparado que en el muro original (Ver Fig. 11.1).
- ❖ Para mejorar el comportamiento en la zona central del muro, se pudo considerar en lugar de colocar mortero de reparación (Ver Fig. 8.13), colocar una zona rectangular de 50 cm. x 50 cm. de concreto simple.

13.2 LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

- ❖ Se propone realizar un futuro ensayo de reparación con esta nueva técnica, pero aplicada a muros que no hayan cruzado el límite de reparación, asociado a distorsiones mayores a $1/200$ [Ref. 5],
- ❖ Comparar el comportamiento de un ensayo similar entre un muro confinado normal, y uno reparado con varillas de GFRP, pero incluyendo en este último algún tipo de anclaje para las varillas en sus extremos y una nueva solución para el sellado de la junta en donde se instala.
- ❖ Se propone estudiar los efectos que tiene la carga vertical en un muro reparado con ésta técnica, pues un gran porcentaje de edificaciones urbanas son de más de dos (02) pisos y sería beneficioso poder contar con una solución más integral para estas edificaciones.
- ❖ Se debería profundizar en las capacidades de la utilización de varillas de GFRP en nuestro medio. Se podrían construir muretes o prismas con inclusión de estas varillas y someterlos a pruebas de corrosión, compresión simple, compresión diagonal, etc.

- ❖ También sería conveniente elaborar muros confinados con refuerzos horizontales de GFRP desde el inicio de su construcción y someterlos a ensayos de carga lateral cíclica para inducir una falla por flexión.

- ❖ Finalmente se propone aplicar este método de reparación en algunas viviendas de un piso en las zonas rurales cercanas a las ciudades afectadas en los últimos sismos que hemos tenido en el país.



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Referencia 1 *“Reparación de un muro de albañilería confinada”*
Ángel San Bartolomé y Castro Morán
Pontificia universidad Católica del Perú
Lima, 2002
- Referencia 2 *“Análisis comparativo del Comportamiento Sísmico de un Muro Confinado y un Muro Armado construidos con unidades de arcilla”*
Tesis en ejecución
Ángel San Bartolomé y Nancy Janampa
Pontificia universidad Católica del Perú
- Referencia 3 *“Comportamiento sísmico de tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio”*
J. Gustavo Tumialan ¹
Ángel San Bartolomé ²
Antonio Nanni ³
¹ Simpson Gumpertz & Heger Inc., Boston, Massachusetts, USA
² Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
³ University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, USA
- Referencia 4 *“Norma Técnica E-070, Albañilería”*
Ministerio de Vivienda
Lima, 2006
- Referencia 5 *“Construcciones de Albañilería – Comportamiento Sísmico y diseño Estructural”*
Ángel San Bartolomé
Pontificia universidad Católica del Perú
Fondo Editorial, 2001