

REPARACIÓN DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA ARMADA

Por: Ángel San Bartolomé y Bruno Vargas Lama
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Este proyecto se ejecutó en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú y tuvo como objetivo verificar la efectividad sísmica de una técnica de reparación aplicada sobre un muro de albañilería armada, hecho con bloques de concreto vibrado, que previamente fue sometido a un ensayo de carga lateral cíclica fallando por fuerza cortante. La técnica de reparación consistió en resanar las fisuras principales del muro original, para luego encamisarlo con malla electrosoldada, recubierta con mortero. Este reforzamiento permitió incrementar la resistencia al corte del muro original y conducirlo hacia una falla por flexión, que finalmente derivó en deslizamiento a través de la base.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación estuvo orientada a la verificación de una técnica de reparación aplicada en un muro de albañilería armada que previamente había fallado por fuerza cortante ante un ensayo de carga lateral cíclica. La técnica mencionada consistió en aplicar mortero con aditivos en las fisuras principales, para luego encamisarlo al muro con malla electrosoldada, tarrajándola con mortero. El objetivo de este reforzamiento fue incrementar la resistencia al corte del muro original, para de esta manera conducirlo hacia una falla por flexión.

Una vez construido el muro de albañilería armada original, utilizando bloques de concreto vibrado, se procedió a ensayarlo a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado. Posteriormente, se procedió a reparar y reforzar el muro para luego someterlo a la misma técnica de ensayo, lo que permitió comparar los comportamientos de ambos muros.

Con el fin de conocer las propiedades de los materiales utilizados en la investigación, se presenta además los resultados de los ensayos realizados tanto en los materiales que intervinieron en la construcción del muro original, como de aquellos que se utilizaron en la reparación.

2. MATERIALES

2.1 Unidad de Albañilería

La unidad de albañilería utilizada fueron bloques de concreto vibrado de fabricación nacional, con dimensiones de 39x14x19 cm y dos celdas perpendiculares a la cara de asiento. De los ensayos realizados en los bloques se obtuvieron los siguientes resultados:

- Variación dimensional : longitud = 0.13%, ancho = 0.14%, altura = 0.32%
- Alabeo : 0.65 mm
- Porcentaje de huecos : 32.5% del área bruta
- Absorción : 6%
- Resistencia a la compresión (f'_b) : 68 kg/cm² sobre área bruta

De acuerdo a la Ref.3, los bloques de concreto vibrado califican como tipo P, aptos para ser utilizados en la construcción de muros portantes.

2.2 Mortero, Concreto y Concreto Líquido (Grout) del Muro Original

El mortero utilizado para el asentado de los bloques del muro original tuvo una proporción volumétrica cemento-cal-arena gruesa 1: 1/2: 4. Este mortero es del tipo P1 (Ref.3) y se utiliza para la construcción de muros portantes. Los ensayos de compresión realizadas en probetas cúbicas de mortero de 5 cm de arista, proporcionaron una resistencia de 156 kg/cm².

El concreto utilizado en la cimentación y la viga solera tuvieron resistencias nominales a compresión iguales a 210 kg/cm² y 175 kg/cm², respectivamente.

El concreto líquido (grout) que se utilizó para rellenar todas las celdas de los bloques del muro original, tuvo una proporción volumétrica cemento-arena-confitillo 1: 2 1/2: 1 1/2, con 10" de slump. La resistencia a compresión de las probetas correspondientes fue 241 kg/cm².

2.3 Acero de Refuerzo del Muro Original

Las varillas de acero corrugado utilizadas como refuerzo vertical y horizontal del muro original fueron de grado 60 (esfuerzo nominal de fluencia: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).

2.4 Malla Electrosoldada del Muro Reparado

La malla electrosoldada utilizada en el muro reparado, estuvo compuesta por varillas de acero corrugado de 5 mm de diámetro, espaciadas a 10 cm. El ensayo de tracción de tres muestras de la malla proporcionó una resistencia promedio de 5673 kg/cm², con un tipo de falla frágil.

2.5 Mortero con Aditivos del Muro Reparado

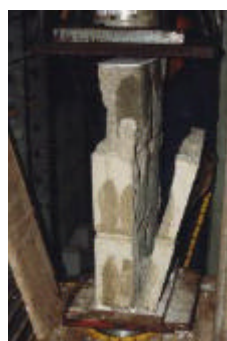
Las grietas principales del muro original, fueron resanadas taponándolas con mortero con aditivos en polvo (Vinnapas RE 5010N y Culminal 8564) que permitieron mejorar su adherencia con los bloques y el mortero existente. Este mortero fue dosificado en peso: 28.8% de cemento, 67% de arena gruesa, 4% de Vinnapas y 0.2% de Culminal. La resistencia a compresión de las probetas cúbicas de 5 cm de arista fue 119 kg/cm².

3. CARACTERÍSTICAS DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

Con el fin de determinar las propiedades de la albañilería simple, rellena con grout, se realizaron ensayos (Fig.1) de compresión axial en 4 pilas de 60 cm de altura y 14 cm de espesor, así como ensayos de compresión diagonal en 4 muretes cuadrados de 80 x 80 cm, obteniéndose las siguientes resistencias características (valor promedio menos una desviación estándar):

- Compresión axial en pilas: $f'_m = 94 \text{ kg/cm}^2$
- Compresión diagonal en muretes: $v'_m = 12.8 \text{ kg/cm}^2$

Fig.1
Ensayo de compresión axial en pilas (izq.) y de compresión diagonal en muretes (der.).



4. MURO DE ALBAÑILERÍA ARMADA ORIGINAL

El muro de albañilería armada original tuvo las características geométricas y la distribución del refuerzo que se indican en la Fig.2. Como refuerzo vertical se utilizó 6 Ø 5/8" espaciados cada 40 cm y como refuerzo horizontal se utilizó 1 Ø 3/8" cada 40 cm, que proporciona una cuantía de 0.0013, ligeramente mayor que la cuantía mínima especificada por la Ref.3 (0.001).

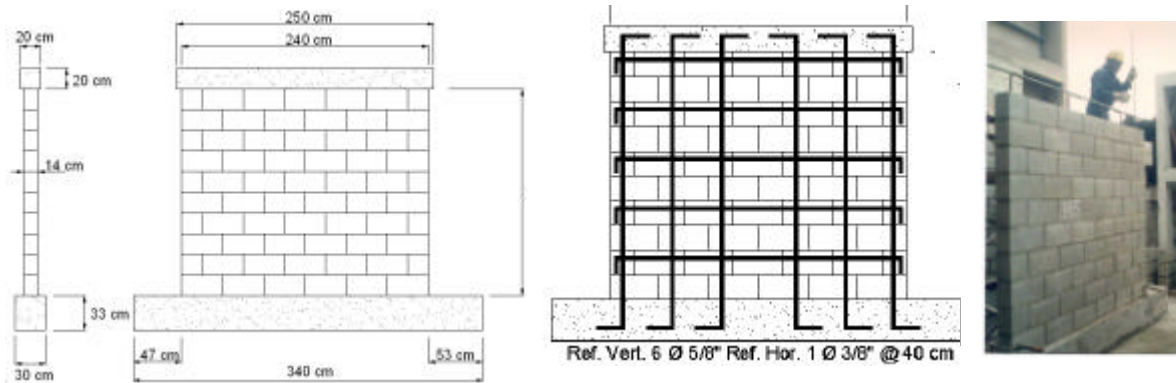


Fig.2. Características geométricas (izq.) y distribución del refuerzo (der.) del muro original.

La resistencia teórica a fuerza cortante proporcionada por el refuerzo horizontal fue 17.89 ton, mientras que la fuerza cortante asociada al mecanismo de falla por flexión fue 23.04 ton, por lo que se esperaba una falla por fuerza cortante. En ambos casos, las resistencias fueron calculadas suponiendo que el refuerzo trabajaba en condición de fluencia con $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

5. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA DEL MURO ORIGINAL

El muro original se ensayó a carga lateral cíclica a una velocidad de 1 ciclo cada 4 minutos, controlando el desplazamiento horizontal D1 (Fig.3) en 8 fases (Tabla 1) mediante un actuador dinámico, hasta alcanzar un desplazamiento de 15.0 mm, ligeramente mayor que el límite de reparación especificado en la Ref.3 ($h/200 = 2100/200 = 11 \text{ mm}$). La instrumentación permitió medir además: a) el posible deslizamiento D2 de la base del muro respecto a la cimentación; y, b) el desplazamiento vertical D3 del talón del muro.

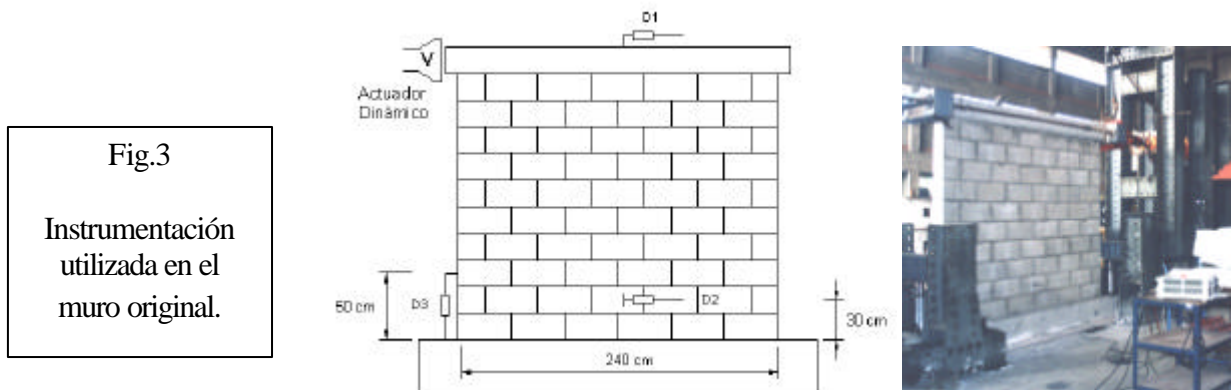


Fig.3
Instrumentación
utilizada en el
muro original.

Tabla 1. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica en el Muro Original.

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8
D1 (mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
No. de ciclos	2	2	2	3	3	3	3	3

5.1 Descripción de las Fallas Observadas

En la fase 2 se presentó la primera fisura de tracción por flexión en las primeras hiladas del muro. Desde la fase 3 hasta la 5 se presentaron fisuras diagonales, predominando la falla por corte. En las fases 7 y 8 se conectaron las fisuras longitudinales de las dos primeras hiladas, pero no se observó deslizamiento. En la Fig.4 se aprecia el estado final en que quedó el muro original.

Fig.4
Estado del muro original al finalizar el ensayo. Se apreció una falla predominante por corte.



6. REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO DEL MURO ORIGINAL

Luego del ensayo del muro original, éste fue reparado reforzándolo por corte en ambas caras con malla electrosoldada. El refuerzo horizontal de la doble malla ($2 \phi 5 \text{ mm} @ 10 \text{ cm}$), proporcionó una resistencia teórica al corte de 48 ton, que sumada a la resistencia dada por el refuerzo horizontal existente (17.89 ton), excedió a la fuerza cortante asociada al mecanismo de falla por flexión (23.04 ton, acápite 4), con lo cual, el muro reparado debía fallar por flexión.

A continuación se indica la secuencia seguida en la reparación y reforzamiento del muro.

- Con una amoladora se ranuró en una profundidad de 1.5 cm (Fig.5) el mortero y los bloques atravesados por las fisuras principales, procediendo luego a limpiar con aire comprimido las zonas trabajadas. Las fisuras muy finas y la base del grout, no fueron resanadas.
- Luego se preparó el mortero con aditivos con el cual se taponó las zonas ranuradas (Fig.6).



Fig.5 (izq.)
Ranurado con amoladora de las fisuras principales.

Fig.6 (der.)
Resane de las ranura con mortero con aditivos.



- Posteriormente, se procedió a realizar perforaciones a través del muro, para que por ellas pasen los conectores que fijaron la malla electrosoldada contra el muro. Estas perforaciones (Fig.7) se hicieron en los puntos de intersección entre las juntas horizontales y verticales (cada 40 cm), a fin de no taladrar al grout ni a las varillas de refuerzo del muro original.

- Una vez colocados los conectores (alambre #8), se instaló la malla electrosoldada en ambas caras del muro, para luego doblar 90° al conector amarrándolo con alambre #16 a las uniones de las barras verticales y horizontales de la malla (Fig.8).



Fig.7 (izq.)
Perforación del muro.
Allí se instalaron los
conectores.



Fig.8 (der.)
Fijación de la malla
electrosoldada.

- En los extremos del muro (Fig.8) se adicionó una franja de malla doblada en forma de “U”. El objetivo de esta franja de malla fue confinar los bordes libres del muro, ya que estaba previsto una falla por flexión con la posible trituración de los talones del muro.
- Luego se taponaron las perforaciones con lechada de cemento, para lo cual se utilizó una botella de plástico como inyector (Fig.9).
- Finalmente, se tarrajeó el muro con mortero, pañeteándolo primeramente con una mezcla cemento-arena gruesa 1:4, y dándole el acabado con una mezcla cemento-arena fina 1:4 (Fig.10). Esto hizo que el grosor del muro original aumentase de 14 a 20 cm (43%).



Fig.9 (izq.)
Inyección de lechada en
las perforaciones.



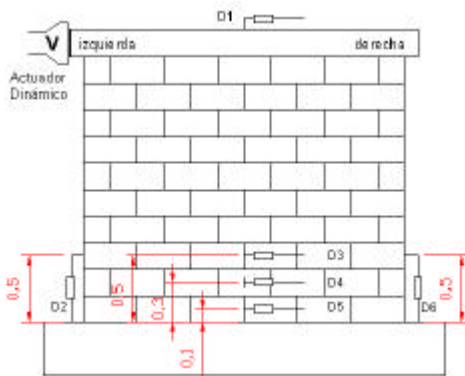
Fig.10 (der.)
Tarrajeo del muro.

7. ENSAYO DE CARGA LATERAL CICLICA DEL MURO REPARADO

El ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado, se realizó en el muro reparado bajo las mismas consideraciones con las que se ensayó el muro original (Tabla 1), con la diferencia que se aplicaron dos fases adicionales a las del ensayo original (fase 9: $D1 = 17.5$ mm y fase 10: $D1 = 20.0$ mm, de 3 ciclos cada una), ya que se pretendió llevar al muro reparado a condiciones extremas.

Para poder registrar de mejor manera el posible deslizamiento del muro a través de sus hiladas inferiores, se utilizó una mayor cantidad de LVDT que en el ensayo del muro original (Fig.11).

Fig.11
Instrumentación y estado final del muro reparado luego del ensayo.



7.1. Descripción de las Fallas Observadas en el Muro Reparado

En la fase 1 se presentó la primera fisura en la base del muro (Fig.12), cuya longitud aumentó en las fases 2 y 3; asimismo, en la fase 3 se presentaron fisuras en la base de la cuarta hilada.

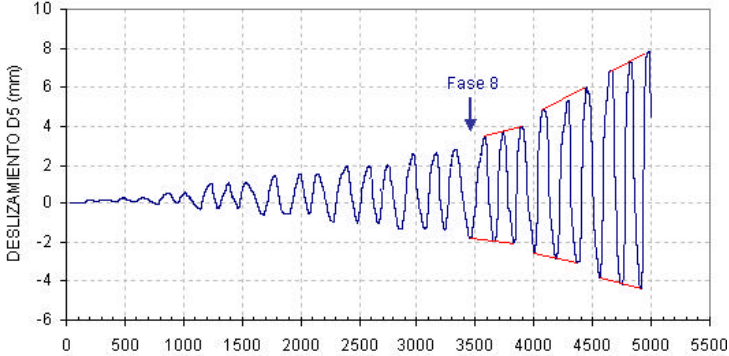


Fig.12
Presencia temprana de fisura en la base del muro.

Las primeras fisuras diagonales se presentaron en la fase 4, las cuales se ubicaron en la mitad superior del muro; estas fisuras fueron muy finas en relación con las presentadas en el muro original. En la fase 5 predominó la falla por flexión, levantándose los talones del muro respecto a la cimentación. A partir de la fase 8 (distorsión de 0.007), se inició la falla por deslizamiento de la base del muro respecto a la cimentación; en la Fig.13 se aprecia cómo se descontrola el desplazamiento D5 durante los ciclos de una misma fase a partir de la fase 8.

La falla por flexión que presentó el muro a partir de la fase 5, causó una leve trituración de uno de los talones (Fig.14), que motivó el desmoronamiento de ese talón después de retirar la malla que lo confinaba. Esta falla por flexión degeneró en deslizamiento, aunque ello ocurrió para distorsiones (0.007) mayores al límite de reparación indicado en la Ref.1 (0.005).

Fig.13
Deslizamiento D5 a partir de la fase 8, durante el tiempo (segundos) que duró el ensayo.



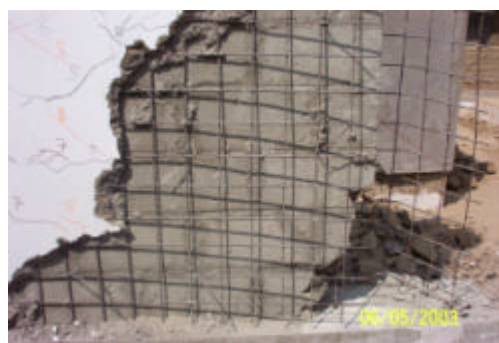


Fig.14. Estado del talón al término del ensayo (izquierda) y desmoronamiento del talón al retirar la malla de confinamiento en forma de U (derecha).

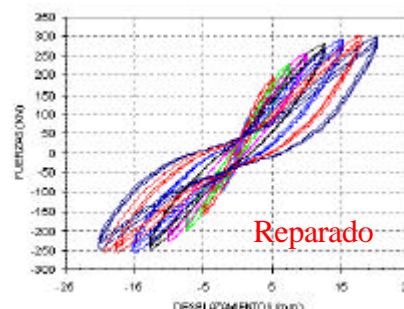
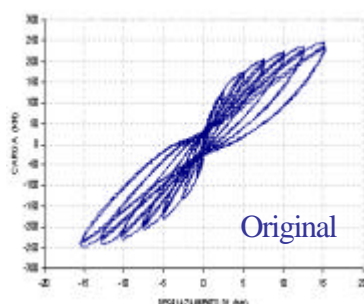
8. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE EL MURO ORIGINAL Y EL REPARADO

8.1. Comportamiento Histerético

Los lazos histeréticos Cortante-Desplazamiento lateral del muro original y del reparado, fueron muy similares según se muestra en la Fig.15. En ambos casos los lazos histeréticos fueron delgados y con la tendencia a pasar por el origen del sistema de referencia, propio de sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez lateral, además de degradar resistencia.

Fig.15

Lazos histeréticos V-D1 de los muros Original y Reparado.



8.2. Rigidez Lateral (K)

La rigidez lateral inicial (fase 1, régimen elástico) y final del muro original y del reparado aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Rigidez Lateral del Muro Original y del Muro Reparado		
Muro	K inicial (ton/mm)	K final (ton/mm)
Original	14.97	1.63 (fase 8)
Reparado	10.57	2.00 (fase 8) y 1.49 (fase 10)

La rigidez lateral elástica del muro reparado alcanzó el 71% de la rigidez lateral elástica del muro original, esto se debe a que en la técnica de reparación utilizada no se resanó al 100% de las fisuras generadas en el ensayo del muro original; sin embargo, la rigidez lateral inicial del muro reparado se incrementó en más de 6.4 veces respecto a la rigidez con la que finalizó el muro original en el ensayo de carga lateral cíclica.

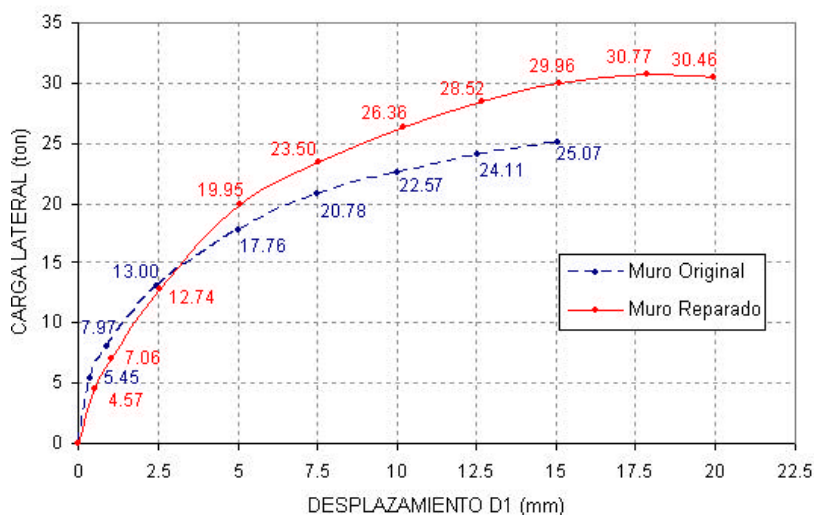
8.3. Resistencia

En la Fig.16 se muestran las envolventes de carga lateral del muro original y del muro reparado. Puede observarse que a partir de la fase 4 la resistencia del muro reparado empezó a ser mayor que la del muro original; esta diferencia se incrementó a medida que avanzó el ensayo hasta llegar a ser del orden de 20%. Asimismo, se puede apreciar que la resistencia del muro reparado empezó a degradar ligeramente a partir de $D1 = 17.5$ mm; este desplazamiento es mayor al límite de reparación especificado en la Ref.3 ($2200/200 = 11.0$ mm).

La resistencia al agrietamiento diagonal del muro reparado (19.15 ton - fase 4) fue 24 % mayor que la resistencia del muro original (15.4 ton – ocurrida entre las fases 3 y 4); esto se debió a que al encamisetar el muro reparado con la malla electrosoldada recubierta con mortero, aumentó el grosor del muro de 14 a 20 cm (43%). El incremento de la resistencia al agrietamiento diagonal (24%) fue menor que el aumento en el espesor del muro (43%), debido a que las fisuras no fueron resanadas completamente, ni en profundidad ni en cantidad (la profundidad del resane fue 1.5 cm en cada cara y las fisuras muy finas no fueron resanadas).

La resistencia máxima del muro reparado (30.77 ton – fase 9) superó en 23% a la alcanzada por el muro original (25.07 ton – fase 8). El incremento en resistencia del muro reparado no pudo ser mayor, debido a que el refuerzo vertical utilizado en el muro original ($6 \phi 5/8''$) no fue modificado, ya que las varillas verticales de la malla electrosoldada no anclaron en la cimentación. Cabe destacar que la resistencia máxima del muro reparado superó en 34% a la fuerza cortante teórica asociada al mecanismo de falla por flexión (23.04 ton, acápite 4), evaluada con $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, por lo que se desprende que en la etapa de grandes desplazamientos laterales, el refuerzo vertical incurrió en su zona de endurecimiento.

Fig.16
Envolvente de la carga lateral de los muros original y reparado.



8.4. Tipo de Falla

El muro original tuvo una falla predominantemente por fuerza cortante, puesto que así había sido diseñado, mientras que el muro reparado tuvo una falla predominantemente por flexión, aunque finalmente esta falla derivó en deslizamiento, pero ello ocurrió para desplazamientos que superaron al límite máximo especificado por la Ref.1.

9. CONCLUSIONES

9.1. Muro Original

- El muro original tuvo una resistencia teórica a corte menor que la asociada a la de flexión, por ello falló predominantemente por corte, por lo cual, en la técnica de reparación se buscó incrementar la resistencia a fuerza cortante por encima de la de flexión.

9.2. Técnica de Reparación

- La técnica de reparación fue relativamente sencilla de aplicar, siendo los trabajos que requieren mayor cuidado los siguientes: a) la profundización de las grietas principales con una amoladora, debido a que se debe tener mucho cuidado para no generar mayor daño al muro; b) la preparación del mortero con aditivos para el resane de las fisuras, debido al control en peso que se tiene que hacer para cada componente; y, c) las perforaciones que deben hacerse para pasar por allí los conectores, puesto que debe emplearse taladro localizándolo en puntos donde no exista refuerzo.

9.3. Muro Reparado

- Rigidez Lateral. La rigidez lateral elástica del muro reparado alcanzó el 71% de la rigidez correspondiente al muro original, esto se debe a que en la técnica de reparación no se resanó al 100% de las fisuras generadas en el ensayo del muro original; sin embargo, la rigidez lateral inicial del muro reparado se incrementó en más de 6.4 veces respecto a la rigidez con la que finalizó el muro original.
- Resistencia al Agrietamiento Diagonal. La resistencia al agrietamiento diagonal del muro reparado fue 24 % mayor que la del muro original. Este incremento de resistencia fue menor que el aumento en el espesor del muro (de 14 a 20 cm: 43%), debido a que las fisuras no fueron resanadas completamente, ni en profundidad ni en cantidad.
- Resistencia Máxima. La resistencia máxima del muro reparado superó en 23% a la alcanzada por el muro original. Este incremento no pudo ser mayor debido a que el refuerzo vertical utilizado en el muro original no fue modificado, ya que las varillas verticales de la malla electrosoldada no anclaron en la cimentación. Cabe destacar que la resistencia máxima del muro reparado superó en 34% a la fuerza cortante teórica asociada al mecanismo de falla por flexión, evaluada con $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, por lo que se desprende que en la etapa de grandes desplazamientos laterales, el refuerzo vertical incurrió en su zona de endurecimiento.
- Efectos de la Malla Electrosoldada. La malla permitió disminuir significativamente el grosor de las fisuras diagonales del muro reparado respecto a las presentadas en el muro original, a su vez, permitió incrementar la resistencia al corte del muro reparado a partir del instante en que se formaron las fisuras diagonales; de este modo se desprende que el muro reparado respondería mejor que el original ante sismos severos, mientras que el muro original tendría un mejor comportamiento ante los sismos moderados. Además, la franja de malla U colocada en el borde libre del muro reparado, permitió confinar de manera adecuada los talones.
- Tipo de Falla. El muro reparado tuvo una falla predominantemente por flexión, aunque finalmente esta falla derivó en deslizamiento, pero ello ocurrió para desplazamientos que superaron al límite máximo especificado por la Ref.1. Puesto que la falla por deslizamiento es muy peligrosa (Ref.4), es necesario que las estructuras a reparar bajo la técnica propuesta presenten una rigidez adecuada.

9.4. Línea Futura de Investigación

Se recomienda realizar las siguientes investigaciones:

- Verificar y cuantificar el comportamiento de un muro de albañilería armada reparado con la técnica propuesta en este trabajo, pero esta vez sometiéndolo a carga vertical, con el fin de simular de una mejor manera las condiciones reales.
- Para incrementar la resistencia a cizalle en la base de los muros reparados se pueden realizar investigaciones adoptando las siguientes soluciones:
 - a) Picar parte del grout y parte del concreto de la cimentación en la misma ubicación para reemplazarlo por concreto nuevo que permita crear llaves de corte en la base del muro.
 - b) Insertar pernos de anclaje en la cimentación soldándolos contra las varillas verticales de la malla electrosoldada.
 - c) Inyectar resina epóxica en la base del grout (zona fisurada), para adherirlo con el concreto de la cimentación. En la base del bloque de la primera hilada reemplazar al mortero original por mortero con aditivos.

10. REFERENCIAS

1. SENCICO, 2003 Norma Técnica de Edificaciones E.030, “Diseño Sismorresistente”.
2. San Bartolomé Ángel, 1998. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial.
3. SENCICO, 2005. Normas Técnicas de Edificación E.070 “Albañilería”.
4. San Bartolomé Ángel, Silva Wilson, Meléndez Eliana y Castro Gino, 2004. Estudio Experimental de Cuatro Alternativas para Impedir la Falla por Deslizamiento en los Muros de Albañilería Armada. Revista COSTOS, Año 10-Edición 124.