

REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DE ALBAÑILERÍA DE BLOQUES ARTESANALES DE CONCRETO

Daniel QUIUN¹, Karhell ALFEREZ², Diana QUINTO²

1. RESUMEN

La investigación trata el problema de la seguridad sísmica de viviendas populares estructuradas en base a muros de albañilería portantes hechos con unidades artesanales de concreto. Este tipo de edificaciones son típicas en la ciudad de Tacna, al sur del Perú, donde el sismo del 23 junio del 2001 (M=8.4) provocó el colapso y deterioro de varias viviendas.

Se evalúa mediante ensayos de laboratorio la efectividad de la técnica de refuerzo consistente en encamisar con malla electrosoldada, muros de albañilería hechos con estas unidades. Con tal propósito, se realizaron 3 ensayos en dos muros a escala natural que se sometieron a carga lateral cíclica controlada. Uno de los muros fue ensayado hasta provocar su agrietamiento diagonal.

Al segundo muro se le adicionó la malla electrosoldada antes del ensayo. Los resultados de las pruebas realizadas fueron bastante satisfactorios. Finalmente, se hace un estudio preliminar de los costos de este sistema de reparación y reforzamiento y se emiten sugerencias.

Palabras Clave: Albañilería confinada, bloques de concreto, reforzamiento, malla electrosoldada.

2. OBJETIVOS

Evaluar la factibilidad técnica y estructural del reforzamiento sísmico de muros de albañilería en viviendas autoconstruidas, utilizando malla electrosoldada.

3. INTRODUCCION

El sismo ocurrido el 23 de Junio del 2001 (M=8.4) afectó muchas poblaciones del sur del Perú y norte de Chile. En particular, dejó evidencias de la vulnerabilidad de las edificaciones de albañilería confinada de la ciudad de Tacna, ya que presentaron un gran número de fallas en muros portantes e incluso no portantes (Ref 1). Un gran porcentaje de las construcciones de viviendas de albañilería confinada de bloques artesanales de concreto se vio afectado. A pesar del mal comportamiento observado, este material sigue siendo usado en nuevas construcciones.

La ciudad de Tacna está en una zona de alta sismicidad histórica, por la influencia del fenómeno de subducción de la placa de Nazca. Entre los terremotos fuertes de los siglos XIX y XX destacan los de 1831, 1868, 1877, 1906 y 1948 (Ref 2). Con el propósito de investigar formas de atenuar los efectos de un nuevo evento sísmico en las viviendas populares, se evaluó el comportamiento sísmico en 3 muros de albañilería confinada, considerando las siguientes condiciones: un muro sin reforzamiento adicional (M1); un muro reforzado con malla electrosoldada (M2), y finalmente el primer muro reparado, y reforzado de forma similar al muro M2, (M3). El empleo de mallas electrosoldadas para muros de albañilería de arcilla industrial ha sido investigado por San Bartolomé y Castro (Ref 3) con cierto éxito.

4. MATERIALES

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron estudios de clasificación de las unidades de albañilería, ensayos de compresión del mortero y del concreto empleado en la construcción de los muros. Asimismo, se realizó ensayos de tracción del acero de refuerzo y de la malla electrosoldada. Además, se construyeron y ensayaron 5 pilas y 5 muretes con el fin de determinar las propiedades mecánicas de la albañilería de estos bloques artesanales. Para la construcción de los muros, pilas y muretes se utilizó las unidades de concreto artesanal de la zona, siendo éstas transportadas desde la ciudad de Tacna al Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú

¹ Profesor Principal, Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú

² Egresada de la Maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú

(PUCP) en Lima .

4.1 Bloques de Concreto

En la investigación se utilizó bloques de concreto fabricados artesanalmente con dimensiones nominales de 40x20x15cm y 3 huecos circulares de diámetro aprox. a 12cm perpendiculares a la cara del asiento (Ver figura 1). De los estudios de clasificación Realizados por A. Castro y L. Quispe (Ref 4), se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 1. Se observa que estas unidades no cumplen con los requisitos especificados en la Norma Técnica Peruana (Ref 5), para unidades de albañilería de uso estructural, pero son muy empleadas por sectores populares.

TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS UNIDADES

Propiedad	Estudio	Norma
Alabeo (mm)	2.73	3
Variación dimensional (%)	0.43	3
% de perforaciones	37.41	25
Succión (%)	32.86	10-20



Figura 1. Bloques de albañilería de concreto

4.2 Concreto y Mortero

El mortero utilizado en las juntas de la albañilería tuvo una proporción volumétrica cemento – arena gruesa 1:5, típico de las viviendas en estudio. Los ensayos de compresión hechos en probetas cúbicas de 5 cm de lado a 28 días de edad, dio como resultado una resistencia promedio de 84 kg/cm². Asimismo, los ensayos en probetas cilíndricas de concreto arrojaron una resistencia promedio $f'c = 227$ kg/cm².

4.3 Acero de refuerzo

Las varillas de acero corrugado fueron de grado 60 y de diámetros nominales de: 5/8", 3/8" y 1/2". Los estribos de columnas y vigas fueron de 1/4" diámetro.

4.4 Malla Electrosoldada

La malla electrosoldada consiste en varillas de acero liso trefilado de 3.2 mm de diámetro, con cocadas cuadradas de 100 mm de lado (ver Figura 2).



Figura 2. Malla electrosoldada 4x4x10

Las características del producto cumplen con la Norma ASTM A-82-94, teniendo esfuerzo de fluencia $f_y = 5600 \text{ kg/cm}^2$, y esfuerzo máximo $f_u = 5600 \text{ kg/cm}^2$; las dimensiones disponibles comercialmente son de 2.02 x 25 m.

5. PROPIEDADES DE ALBAÑILERÍA SIMPLE

Para determinar las propiedades de la albañilería simple, se realizó ensayos de compresión axial en 5 pilas de 3 hiladas cada una, y de compresión diagonal en 5 muretes de 4 hiladas, como se muestra en la figura 3. Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad E_m , la resistencia a la compresión f'_m , el módulo de corte G_m y la resistencia al corte v'_m , se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

Compresión axial en pilas	E_m	36760 Kg/cm^2
	f'_m	16.8 Kg/cm^2
Compresión diagonal en muretes	G_m	1587 Kg/cm^2
	v'_m	2.59 Kg/cm^2

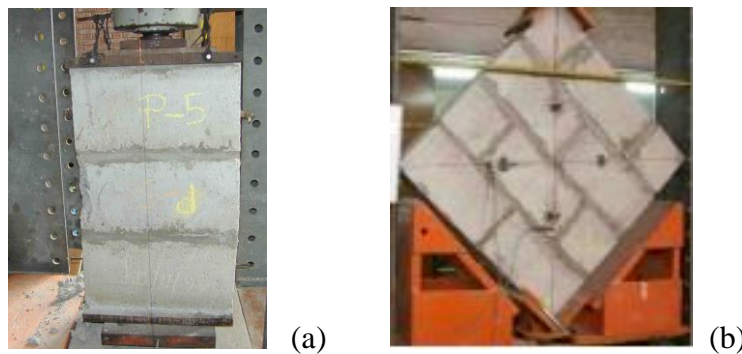


Figura 3. Ensayos en pilas (a) y muretes (b)

6. MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

Ambos muros tuvieron características similares en dimensiones y distribución de refuerzos (figura 4). Ambos muros se construyeron en forma paralela (figuras 5).

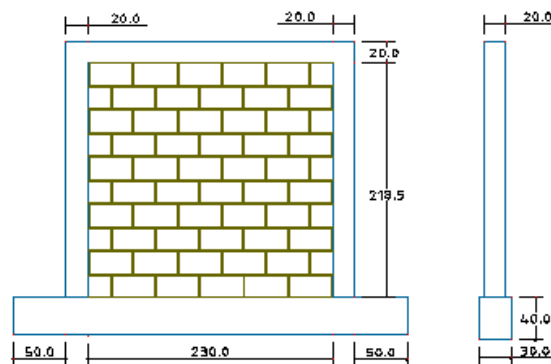


Figura 4. Dimensiones de los muros M1 y M2

Los elementos de concreto armado tuvieron las dimensiones y refuerzos siguientes:

Viga de cimentación: 30 x 35 cm., 4 $\varnothing 5/8''$, estribos de $3/8'' @ 10\text{cm}$.

Columnas: 20 x 20 cm., 4 $\varnothing 1/2''$, estribos de $1/4'' 1 @ 5, 4 @ 10, R @ 20\text{cm}$.

Viga solera: 20 x 20 cm., 4 $\varnothing 1/2''$, estribos de $1/4'' 1 @ 5, 4 @ 10, R @ 20\text{cm}$.

La cantidad y distribución de los refuerzos cumplen con los requisitos mínimos especificados en las Normas Peruanas de Edificación, E.060 de concreto armado (Ref 6) y E.070 de albañilería (Ref 7).

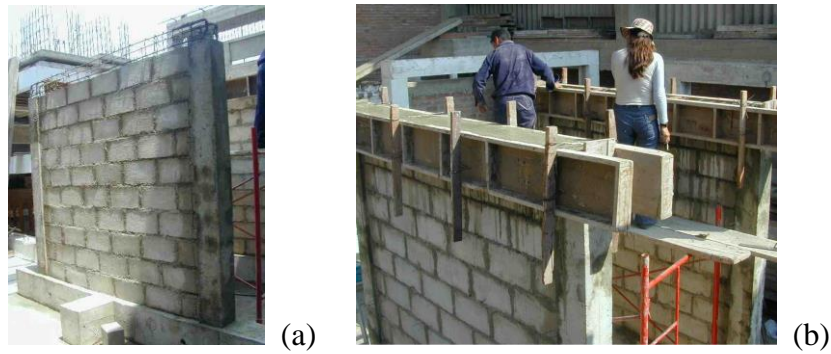


Figura 5. Construcción simultánea de los muros M1 y M2

7. REFORZAMIENTO DEL MURO M2

El muro reforzado M2, fue escogido al azar, ya que ambos muros contaban con características similares.

La malla electrosoldada fue cortada en paneles que se ajustaban a las dimensiones interiores del pórtico de concreto. Los paneles se instalaron en ambas caras del muro y se interconectaron entre sí con ganchos fabricados con alambre #10. Los ganchos se colocaron a un espaciamiento de 45 cm. en sentido horizontal y en las juntas cada 2 hiladas. La malla se ancló a las columnas una longitud de 1.5 cm, en perforaciones hechas con ayuda de un taladro. El proceso de corte e instalación de la malla se puede apreciar en las figuras 6a, 6b y 6c.

Realizada la colocación de la malla se procedió al pañeteo del muro con mortero grueso de 1:4. El tarrajeo se realizó con mortero fino 1:5 (ver figura 7a y 7b). El aspecto de los muros terminados listos para su transporte a la losa de ensayos se observa en la figura 8.

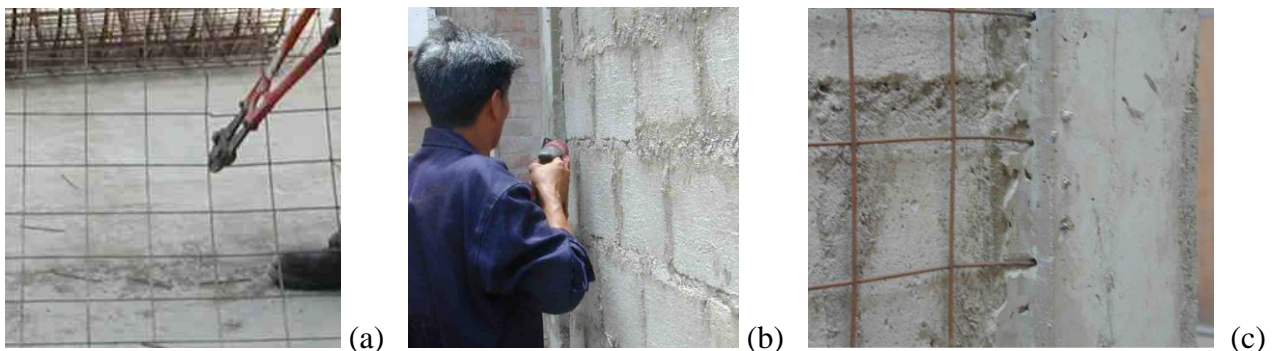


Figura 6. Colocación de la malla en el muro M2

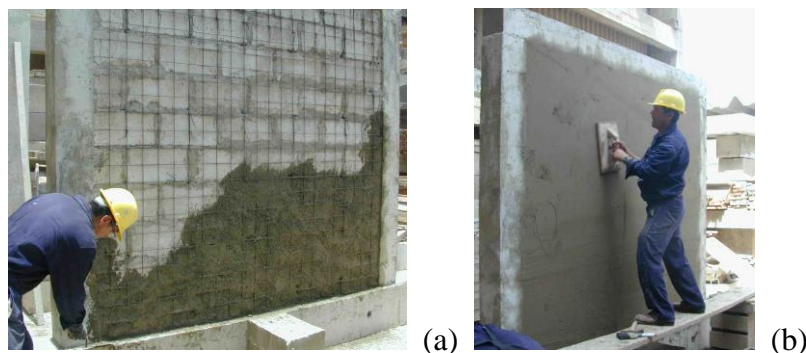


Figura 7. Pañeteo y tarrajeo del muro M2



Figura 8. Muros M1 y M2 culminados antes del ensayo

8. REPARACION Y REFORZAMIENTO DEL MURO M1 (MURO M3)

La reparación y reforzamiento del muro M1 dio lugar al muro M3. Este proceso tuvo como fin emular el comportamiento de un muro reparado, tras haber fallado luego de un posible sismo. Esta condición sería la que tienen numerosas viviendas existentes tras el terremoto del 2001.

Previa evaluación, el proceso de reparación comenzó con el reemplazo de unidades dañadas (ver figuras 9a ,9b ,9c). En el ensayo del muro M2 se pudo observar una falla del anclaje de la malla con el pórtico. Además, se observó la falla por flexión de los talones. Por esta razón, en este muro M3 se encamisó uno de los talones. Este picado y encamisado con la malla tuvo un traslape de 50 cm con el muro de albañilería. Con ayuda de un taladro se procuró un mayor anclaje de la malla al pórtico (Ver figuras 10a, 10b, 10c). Colocada la malla en el talón, se realizó el vaciado de mezcla. Posteriormente, se repitió todo el proceso de pañeteo y tarrajeo de forma similar al mencionado en el acápite 6 (ver figura 11).



Figura 9. Evaluación del muro M1 y reemplazo de unidades

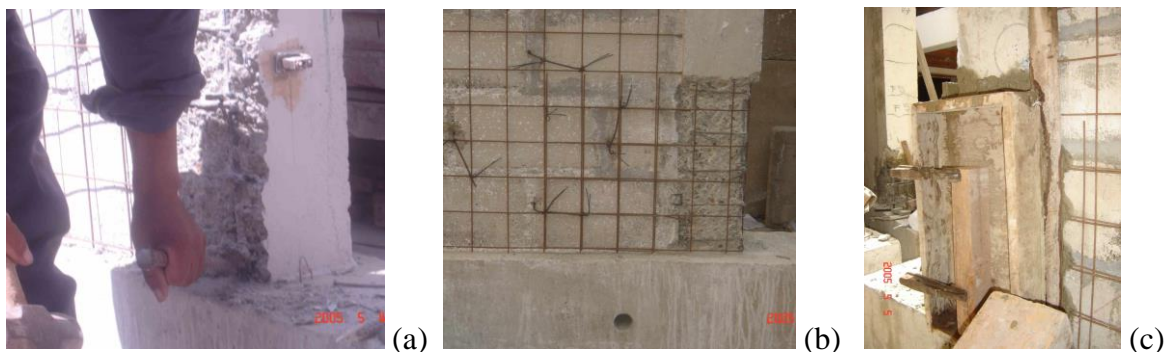


Figura 10. Encamisado del talón derecho en muro M3



Figura 11. Muro M3, reparado y reforzado

9. ENSAYO DE CARGA CÍCLICA

Los ensayos de carga lateral cíclica se realizaron a una edad de 28 días para los muros M1, M2. Para el caso del muro M3, éste se llevó a cabo 1 mes luego de finalizada la reparación y reforzamiento. El registro de datos se obtuvo a través de sensores de desplazamiento LVDT's colocados en el muro como se muestra en la figura 12.

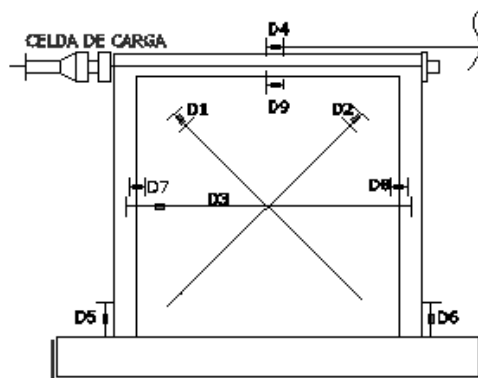


Figura 12. Disposición de sensores en los muros

9.1 Ensayo del Muro M1

El muro M1 (sin reforzamiento), fue sometido a 8 fases de carga (ver figura 13). El ensayo se realizó buscando dejar el muro en condiciones reparables, sin considerar el límite establecido por la Norma Peruana E.030 (Ref 8). Según ésta, la distorsión máxima de reparabilidad de la albañilería es de 0.5% (1/200). Este valor está sustentado en numerosos ensayos realizados en muros de albañilería de distinto tipo a lo largo de más de 25 años en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, en proyectos conducidos por San Bartolomé (Ref 9).

9.2 Ensayo del Muro M2 y M3

Los muros M2 y M3 se ensayaron a 13 fases de carga. En este ensayo se buscó someter a los muros a la mayor carga posible mientras sean estables.



Figura 13. Ensayo muro M3

10. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

10.1 Fases de carga

En la Tabla 3 se indican las fases de carga de cada muro, junto con los ciclos de carga y descarga y una medida de la distorsión asociada. Las 8 primeras fueron idénticas en ambos muros.

TABLA 3. CARACTERISTICAS DEL ENSAYO

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
# ciclos	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
l/distorsión	4800	1600	1200	800	600	480	320	240	200	160	120	100	80

10.2 Carga máxima y desplazamiento horizontal asociado

En la Tabla 4 se indica la carga máxima (en ton) medida en cada fase de carga de cada muro, junto con los desplazamientos laterales máximos registrados (Δ en mm).

TABLA 4. CARGA MÁXIMA VS. DESPLAZAMIENTO DE AMBOS MUROS

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Δ máx.(mm)	0.5	1.5	2	3	4	5	7.5	10	12	15	20	25	30
Muro M1	6.75	8.89	9.20	10.07	10.68	10.84	11.14	11.11	-	-	-	-	-
Muro M2	8.43	14.19	15.74	18.17	19.93	20.97	22.01	22.68	22.38	22.05	21.24	19.40	17.97
Muro M3	6.56	11.7	13.3	15	16.4	17.9	20.2	21.1	20.8	20.1	19.9	18.9	16.5

10.3 Rigidez lateral

La rigidez lateral inicial teórica (K_0) de los muros se calculó suponiendo que actúan como elementos en voladizo, ya que no existen vigas de acoplamiento. Los valores determinados se muestran en la tabla 5. Para el caso del muro M1, la rigidez teórica fue 47 % menor al valor experimental. En cambio, el muro M2 alcanzó una rigidez inicial mayor a la teórica en un 33%. En el caso del muro M3, su rigidez inicial antes de ser reparado sería la rigidez final del muro M1. La rigidez alcanzada durante la primera fase de carga del muro M3 fue ligeramente superior en un 5% a la rigidez inicial del muro M1.

TABLA 5. VALORES DE RIGIDEZ LATERAL

MURO	K teórico (Kg/cm)	K_0 Inicial (Kg/cm)	Razón $M^*/M1$	K_0 Final (Kg/cm)	Razón $M^*/M1$
M1	77200	111157	1	10387.75	1.00
M2	-	147405	1.3	6878.92	0.66
M3	-	117260	1.0	4837.60	0.47

10.4 Módulo de corte

El módulo de corte se incrementa apreciablemente en los muros M2 y M3 respecto al muro M1, como se puede observar en el tabla 6.

TABLA 6. MODULOS DE CORTE

MURO	G_m Inicial (Kg/cm ²)	Razón $M^*/M1$
M1	11852	1.00
M2	30531	2.58
M3	18132	1.53

10.5 Resistencia

La resistencia a carga lateral en los muros M2 y M3, fue considerablemente mayor a la resistencia en el muro M1, como se puede apreciar en la tabla 7 y en la figura 14.

TABLA 7. RESISTENCIA MÁXIMA

Muro	Fase	ΔH (mm)	P máx. (Kg)	Razón M*/M1	P Ultimo (Kg)	Razón M*/M1
M1	7	8	11467	1.00	11266	1.00
M2	8	10	22236	1.93	17615	1.56
M3	8	10	20678	1.80	16189	1.44

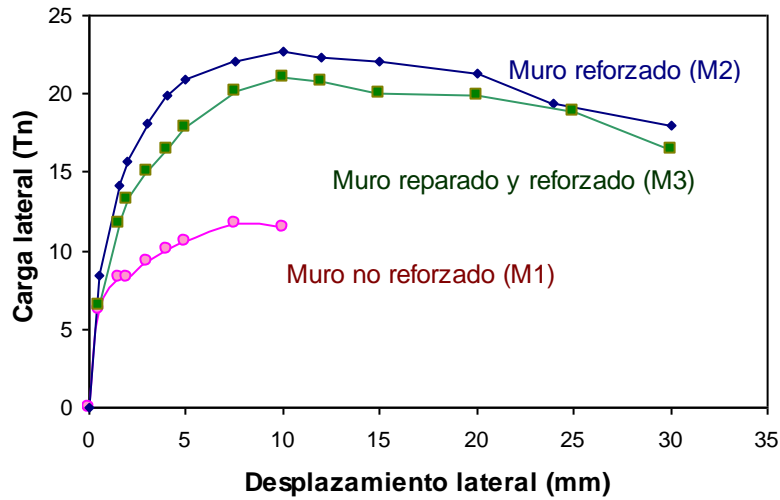


Figura 14. Envoltente Carga lateral máxima vs. Desplazamiento

10.6 Agrietamiento Diagonal

La primera fisura por agrietamiento diagonal ocurrió en la fase 2 del muro M1 con fisuras finas, llegando a presentar grietas de 7cm de ancho en la fase final. Los muros M2 y M3 sólo presentaron fisuras diagonales finas, pero en ambos, la unión pórtico - muro sufrió falla de adherencia. Las figuras 15a, 15b, 15c, presentan el estado de las grietas más importantes del muro M1 al final del ensayo en la fase 8 (distorsión de 1/240), mientras que la figura 16 muestra la secuencia de agrietamiento en los tres muros.

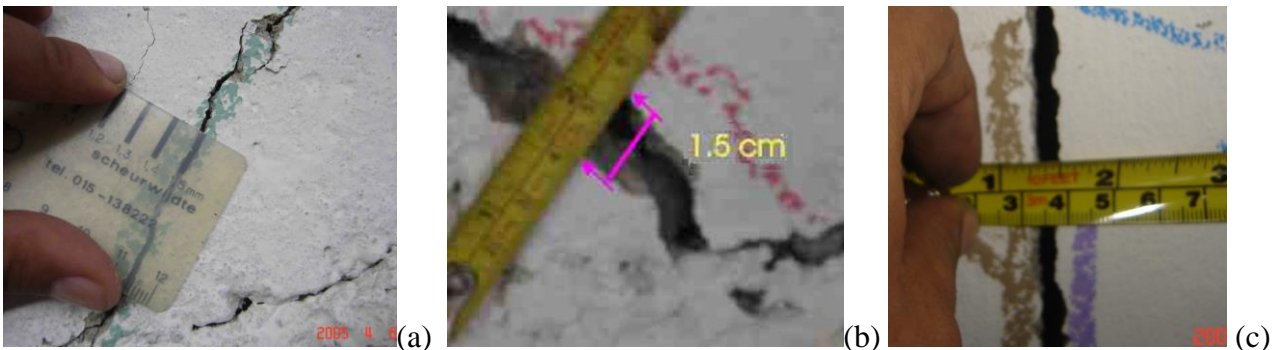


Figura 15. Medida de grietas durante los ensayos

**TABLA 8 DAMNIFICADOS DEL SISMO
DEL 23 DE JUNIO DEL 2001, CIUDAD DE TACNA**

	Tacna	Ciudad Nueva	Alto de la alianza	Gregorio Albarracin
Damnificados	5150	9500	9932	5150
Heridos	16	3	43	16
Fallecidos	0	3	2	0
Viviendas afectadas	2059	1753	1626	2089
destruidas	58	889	484	58

11.2 Comparación de costos

Se presenta en la Tabla 9 la comparación de costos, a fin de ver las ventajas económicas que representaría el reforzamiento de un muro sin daños, en relación a la reparación y reforzamiento de un muro dañado, teniendo en cuenta sólo los elementos en común de ambos muros.

Debe considerarse que la aplicación del reforzamiento a una situación real, dependerá de un análisis integral de la edificación, y que no todos los muros necesitarán reforzamiento.

TABLA 9 .COMPARACION DE COSTOS

Actividad	Recurso	Costo en \$
Reforzamiento por m2	Malla (dos caras)	4.3
	Recubrimiento	3.2
	Mano de obra	4.3
Total		11.8
Reparación por m2	Reemplazo de unidades	2.8
	Recubrimiento	3.2
	Mano de obra	4.3
Total		10.4
Reparación y reforzamiento (Costo total)		22.2

12. CONCLUSIONES

El muro M1 falló por corte, las primeras fisuras diagonales aparecieron en la fase 2 (distorsión de 1/1600) y se hicieron visibles poco después, debiendo culminar el ensayo en la fase 8, con una distorsión de 1/240, menor a la aceptada como límite de reparabilidad en la Norma Sismorresistente ($0.005 = 1/200$). El muro M2 falló por flexión en la fase 2, las primeras fisuras diagonales aparecieron recién en la fase 13, con una distorsión de 0.0125 (1/80). Es decir, la incorporación del refuerzo de las mallas modificó el comportamiento sísmico.

El muro M3 al igual que el muro M2, falló por flexión en la fase 2, pero las fallas se concentraron en la columna con el talón confinado.

En el ensayo del muro M1, las unidades de albañilería presentaron grietas visibles a distorsiones menores de 1/200. De haberse tenido en cuenta la carga axial por cargas de gravedad, estos efectos habrían empeorado. Se puede concluir que debe descartarse esta unidad para albañilería en muros portantes en zonas de alta sismicidad como es el caso de la ciudad de Tacna.

Con respecto al reforzamiento del muro M2, la técnica usada no tuvo mayores inconvenientes de aplicación. Sólo en el anclaje muro - columna se requirió el uso de un taladro, pero la elaboración de ganchos para unir las mallas resulta simple. Puede decirse que la técnica en su conjunto no es complicada y es factible de llevarse a cabo con personal instruido adecuadamente.

En la reparación del muro M3, el reemplazo de unidades presentó cierta dificultad, dada la fragilidad de las mismas. Esta operación se llevó a cabo reemplazando sólo las unidades más afectadas.

En relación a los resultados obtenidos, se pudo apreciar que el muro M2, reforzado antes del ensayo, tiene una resistencia y rigidez inicial visiblemente superior al muro M1, lo que demuestra la efectividad estructural del reforzamiento. Esto permitiría a muros similares soportar sismos moderados en el rango elástico y sismos severos con un comportamiento dúctil.

El muro M3, presenta un comportamiento similar al muro M2, pero la rigidez y resistencia inicial, son comparativamente similares al muro M1.

Las fallas observadas en los talones de las columnas del muro M2 fueron reducidas en el talón encamisado del muro M3.

En la evaluación de costos, se observa la importancia que tiene realizar el reforzamiento antes de que ocurra la falla, o de preverlo durante la construcción. Los costos de reforzamiento aunque son aparentemente elevados, disminuirían considerablemente el riesgo y daño que estas viviendas sufrirían de darse el caso de un nuevo sismo, de igual o mayor intensidad al del 2001.

13 REFERENCIAS

- (1) INDECI. (2001). Evaluación de daños sismo 2001. Lima, Perú.
- (2) Silgado E. (1978). Historia de los Sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974), Boletín No.3 Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, Instituto de Geología y Minería, Lima.
- (3) San Bartolomé A y Castro A. (2003). Reparación de un muro de Albañilería confinada XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Ponencia EM-70, Colegio de Ingenieros del Perú. Iquitos, Perú.
- (4) Castro, A., Quispe L. (2004). “Ensayos en Pilas y unidades, Empleando Unidades Producidas en el Cono Norte de la Ciudad de Tacna”. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada de Tacna. Tacna, Perú.
- (5) INDECOPI. (2002). Unidades de albañilería. Ladrillos de Concreto. Norma técnica Peruana NPT 399.601 Lima, Perú.
- (6) SENCICO. (1989). Norma Técnica Peruana E.060. Concreto Armado. Lima, Perú.
- (7) ININVI. (1982). Norma Técnica Peruana E.070. Albañilería. Lima, Perú.
- (8) SENCICO. (2003). Norma Técnica Peruana E030. Diseño Sismorresistente. Lima, Perú
- (9) San Bartolomé A. (1998). Construcciones de albañilería, Segunda Edición, Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.