

REPARACIÓN Y REFUERZO POR MEDIO DE FLEJES DE MUROS DE MAMPOSTERÍA PARA VIVIENDA DE BAJO COSTO: ESTUDIO EXPERIMENTAL

Horacio Ramírez de Alba¹ y B. Bricia Carreón Guardado²

Resumen: Se propone el uso de flejes de plástico y de acero para la reparación y el refuerzo de muros de mampostería para viviendas de bajo costo. Se describen diez técnicas para cada modalidad y se reportan los resultados de tres etapas de trabajo experimental. Las dos primeras se refieren a modelos prismáticos sometidos a compresión diagonal. La tercera etapa consiste de modelos de muros sometidos a cargas cíclicas representando una técnica de reparación y una de refuerzo, se ensayaron dos muros con daño previo para estudiar la técnica de reparación y dos muros en estado original para la de refuerzo. Se presentan los resultados experimentales en términos del comportamiento histerético. Se reporta el incremento encontrado en resistencia, capacidad de deformación y energía disipada. Se hacen comparaciones entre las pruebas realizadas en los muros y con las etapas previas. Se concluye que las técnicas aquí reportadas y estudiadas tienen potencial para disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones para vivienda a bajo costo.

REPAIR AND REHABILITATION OF MASONRY WALLS FOR LOW COST HOUSING USING STEEL AND PLASTIC STRAPS

Abstract: In this paper the use of steel and plastic straps to the rehabilitation of existing masonry walls for low cost housing is investigated. Ten techniques to repair or strengthen masonry walls are described, the results of three experimental stages are presented and discussed. The two first stages consisted of diagonal compression tests on prismatic models representing the techniques proposed. The third stage refers to the experimental study on wall models subjected to cyclic lateral loads representing two of the best techniques studied in the first stages. Two walls with previous damage were tested to study the repair technique with steel straps and two walls without previous damage were tested to study the strengthening technique with plastic straps. The experimental results are presented in terms of the hysteretic behavior observed. The increment in strength, deformation capacity and energy dissipation is evaluated. The results are compared between the different models and with the results of the previous stages. Comparing with the results of other rehabilitation methods reported in recent papers it is shown that the techniques here studied have similar structural efficiencies but at lower cost. It is concluded that the techniques here introduced and investigated have potential application to decrease the vulnerability of low cost housing.

DESCRIPCIÓN GENERAL

Se parte de la necesidad de reparar y reforzar edificaciones de carácter habitacional que han sufrido daño por el efecto destructivo de los sismos o bien son propensas a sufrirlos, Salas (1992), Iglesias (1999), Sordo (1995). La mayoría de las técnicas de reparación y refuerzo existentes son costosas y en la práctica se aplican a edificaciones históricas o de especial importancia, De la Torre (1999). Para las viviendas de bajo costo no se tienen procedimientos confiables y económicos por lo que se proponen diferentes técnicas de reparación y refuerzo utilizando flejes metálicos y de plástico. Una breve descripción de las técnicas propuestas, se presenta a continuación:

TR1. Flejes de acero (32 por 0.50 mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro con separación uniforme, se fijan por medio de clavos de acero de 50mm de longitud para concreto. Se logra adherencia adicional con bandas de fibra de vidrio saturadas con resina, colocadas entre el muro y el fleje.

(1) Profesor e Investigador, Centro de Investigación de Ingeniería Estructural. Facultad de Ingeniería UAEM, Toluca, México.

(2) Egresada con beca CONACyT de la Maestría en Estructuras de la Facultad de Ingeniería, UAEM, Toluca, México.

- TR2. Flejes de plástico (16 por 0.8 mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro y se tensan con una herramienta manual, se cierran con dos grapas. Se logra adherencia adicional con bandas de fibra de vidrio colocadas como en el caso anterior.
- TR3. Flejes de acero (32 por 0.5 mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro con separación uniforme y se fijan en los extremos con cuatro clavos de acero de 50 mm para concreto.
- TR4. Flejes dobles de plástico (16 por 0.8mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro, se tensan con herramienta manual y se cierran con dos grapas. Se agregan flejes del mismo tipo en forma vertical con separación de 200 mm.
- TR5. En las esquinas del muro se colocan ángulos metálicos con anillos soldados (eslabones de cadena), se pasan flejes de plástico de forma diagonal en ambas caras del muro los cuales se tensan con una herramienta manual y se cierran con grapas dobles.
- TR6. Flejes de plástico (16 por 0.8 mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro como en TR2 y se agregan, entre el muro y los flejes, tiras delgadas de fibra de vidrio con pasta de resina.
- TR7. Flejes de acero (32 por 0.5mm) se colocan horizontalmente alrededor del muro y se fijan en los extremos con pernos metálicos de cuerda continua de 10 mm de diámetro pasados en el espesor del muro y asegurados con rondanas y tuercas en sus extremos.
- TR8. Se emplean fijadores de acero plano con anillos metálicos soldados. Estos se colocan en los extremos del muro que sirven para fijar los flejes metálicos dobles (16 por 0.5 mm) de forma horizontal los cuales se tensan con la herramienta manual y se fijan con grapas dobles.
- TR9. Se colocan en las cuatro esquinas del muro cajas metálicas triangulares con cuatro anillos metálicos soldados en cada cara. Se colocan flejes de acero de forma diagonal en cada anillo metálico como en TR8.
- TR10. Similar a TR8 pero con flejes de plástico en lugar de metálicos.

Estas diez técnicas con ligeras variantes se pueden aplicar tanto en los casos de reparación (elementos con daño previo) como de refuerzo (elementos sin daño previo). Se establecieron tres etapas experimentales para determinar la efectividad de las técnicas en muretes y muros hechos con ladrillos de barro de cocido, material muy usado en México. En la primera etapa, se ensayaron en compresión diagonal dos muretes en su estado original y dos muretes previamente dañados para cada técnica. Las dimensiones de los muretes, 360mm de largo y 360mm de alto y su espesor de 120 mm que corresponde al del ladrillo. La unión se realizó con mortero con resistencia promedio de 16MPa. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados encontrados. Para evaluar la eficiencia de los métodos se introduce el indicador I. Para casos de reparación (con daño previo), I1 es la relación entre el esfuerzo obtenido en la prueba del murete reparado según cada técnica y el esfuerzo correspondiente a la prueba del murete original. Para casos de refuerzo (sin daño previo), I2 es la relación entre el esfuerzo obtenido en el murete reforzado con la técnica correspondiente y el esfuerzo promedio de todos los muretes originales que resultó de 0.507 MPa. También se evaluaron el costo y el nivel de especialización de la mano de obra implícitos en cada técnica esto se consigna en la Tabla 1. Se puede observar que todas las técnicas permiten un incremento en la resistencia puesto que el indicador I resulta mayor que 1.0, considerando el incremento de resistencia, el costo y el nivel de especialización se tiene que las tres mejores técnicas para reparación son TR2, TR9 y TR10 y para refuerzo TR2, TR4 y TR9.

Tabla 1: Resumen de la primera etapa.

Número de Técnica	\bar{I}_1	\bar{I}_2	Costo Pesos/m ²	Relación de costo promedio	Nivel de facilidad de aplicación
TR1	1.23	1.94	68.30	1.50	3
TR2	1.39	2.45	32.50	0.71	1
TR3	1.18	2.1	54.15	1.19	2
TR4	1.21	1.74	11.80	0.26	1
TR5	1.23	1.32	39.56	0.87	1
TR6	1.35	2.37	61.80	1.36	1
TR7	1.07	1.84	58.89	1.29	3
TR8	1.18	1.96	48.00	1.05	2
TR9	2.16	2.31	46.42	1.02	2
TR10	1.39	1.3	34.50	0.76	1

En la segunda etapa, se realizaron pruebas adicionales apegándose a la reglamentación local NTCM(1993) de tal manera de contar con datos de la variabilidad esperada. Para ello se realizaron pruebas a compresión diagonal en nueve muretes para cada técnica (tres en reparación y tres en refuerzo). Un resumen de los resultados para las técnicas de reparación se muestra en la tabla 2 y para las técnicas de refuerzo en la tabla 3. Se observa que todas las técnicas

permiten incrementar la capacidad. Como no se contaba con recursos económicos para realizar pruebas en muros completos aplicando todas las técnicas, se decidió elegir la mejor en reparación y la mejor en refuerzo de acuerdo a los resultados de esta etapa experimental.

De tal manera que en la tercera etapa se estudia experimentalmente el comportamiento de una técnica de reparación (TR9: fleje de acero colocados en las diagonales del muro por medio de ángulos metálicos con eslabones soldados) y otra de refuerzo (TR2: flejes de plástico tensados confinando el muro adheridos por medio de resina de uso general y fibra de vidrio). Los resultados encontrados en la prueba de muros junto con los resultados de la primera y segunda etapa (muretes) se usan para poder establecer lineamientos de diseño y construcción para su aplicación práctica. Las dimensiones de los muros ensayados fueron de 2.60m de largo y 2.30m de altura, dos confinados por medio de elementos horizontales (dalas) y verticales (castillos) de concreto armado (MC) y dos sin confinamiento (MS). Por ser esta etapa la más representativa, en seguida se presenta una descripción detallada de sus partes, principalmente los resultados encontrados.

Tabla 2: Resumen de los resultados de las pruebas, 27 especímenes “reparación”.

Número de técnica	RNS Original	RNS Reparado	\bar{I}_1	CV	Costo pesos /m2	Relación de costo (promedio)	Facilidad de aplicación
TR2	1.717	2.704	1.62	0.27	32.50	0.71	1
TR9	1.426	1.964	2.17	0.23	46.42	1.02	2
TR10	1.670	1.665	1.03	0.34	34.50	0.76	2

Tabla 3: Resumen de los resultados de las pruebas, 27 especímenes “Refuerzo”.

Número de Técnica	RNS	\bar{I}_2	CV	Costo Pesos /m2	Relación de Costo (prom.)	Facilidad de aplicación
TR2	2.097	1.31	0.17	32.50	0.71	1
TR4	1.742	1.09	0.20	11.80	0.26	1
TR9	3.112	1.94	0.07	46.42	1.02	2

Descripción de los modelos experimentales

Los muros se construyeron y ensayaron en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la FIUAEM, sobre una losa de pruebas a la cual se fijaron elementos rígidos de concreto armado de 3.10 m de largo por 0.50 m de ancho y 0.30 m de peralte que sirvieron como cimentación de los muros. Cada técnica se aplicó en un MC y un MS, en el caso de reparación se aplicaron cargas previas hasta causar daño considerable, en el caso de refuerzo la prueba se hizo en el muro original. Los MC tenían castillos y dalas de concreto armado ubicados en la periferia con sección transversal de 0.15m por 0.12 m, con 4 varillas corrugadas de 10mm grado 42, estribos de barras lisas de 6mm (alambón) con espaciamiento de 150mm. Para los MS, se construyó en la parte superior un elemento en forma de C con sección transversal rectangular de 100mm por 100mm, esto con la finalidad de aplicar las cargas verticales y laterales. Para evitar el levantamiento del muro, se decidió incluir elementos verticales para ligar el elemento superior con el elemento horizontal de rigidez. Estos se desligaron por medio de una junta de poliestireno expandido, el refuerzo longitudinal se colocó cruzado en la parte inferior para formar una articulación, de esta manera se evitó que actuara como un muro confinado. Se empleó mano de obra convencional y se considera que el procedimiento constructivo y los detalles fueron consistentes con la práctica actual en estructuras de mampostería.

Aplicación de la técnica de refuerzo

Los principales pasos para la aplicación de la técnica TR2 se describen a continuación:

- Realizar perforaciones en los extremos del muro a cada 20cm, con taladro y una broca de 13mm (½”).
- Se pasa el fleje de plástico por las perforaciones envolviendo al muro, los extremos del fleje se tensan con la herramienta flejadora y se colocan dos grapas en el extremo del fleje.
- Se corta la fibra de vidrio en tiras con un ancho de 30mm aproximadamente. Con la ayuda de la espátula se coloca la fibra de vidrio para que cubra los espacios entre el fleje y el muro.
- Se aplica la resina por entre la fibra de vidrio para adherir el fleje con el muro.

- e) Se aplica otra capa de fleje de plástico para ello se repiten los pasos b), c) y d) sobre los primeros flejes aplicados.
- f) La resina se deja secar durante un mínimo de 72 horas para que adquiera resistencia. Una vez colocado el refuerzo se procedió a instrumentar el muro para la prueba.

Aplicación de la técnica de reparación.

Los principales pasos para la aplicación de la técnica TR9 se describen a continuación:

- a) Se practica una ranura en escuadra con 200 mm por lado en las cuatro esquinas del muro para colocar un ángulo metálico, después se rellenan perfectamente los huecos con mortero y se colocan las placas que cuentan con eslabones soldados. Estas placas se fijan a los ángulos por medio de tornillos soldados a los mismos.
- b) Se coloca el fleje en diagonal haciéndolo pasar por entre los eslabones de las esquinas correspondientes, realizando esto en ambas diagonales e intercalando los flejes, es decir, primero se coloca un fleje en una de las caras, después otro en la otra cara.
- c) Los flejes se llevan a su máxima tensión utilizando la herramienta tensadora. Se fija cada tira de fleje con la llave ponchadora hasta asegurar la máxima tensión, en este caso se utilizan dos grapas para mayor seguridad.

La figura 1 muestra fotografías de modelos en los que se han aplicado las técnicas, a) refuerzo, b) reparación.



a) Modelo reforzado



b) Modelo reparado

Figura 1: Aplicación de las técnicas.

El sistema de carga consistió de un cilindro hidráulico de doble acción con capacidad de 900 kN en empuje y 350 kN en tiro, el cual se fijó a un marco metálico rígido de reacción por medio de dos placas de acero de 0.25m por 0.25m y barras roscadas, el cilindro se conectó al muro a la altura de la dala superior. En empuje la carga es aplicada directamente por el vástago del cilindro sobre la placa de apoyo, en tracción, la carga es aplicada en el otro extremo por medio de las barras metálicas colocadas en los costados exteriores del muro. La fuerza en el cilindro se aplicó por medio de una bomba hidráulica manual y la presión se controló mediante dos manómetros digitales. El efecto de la carga vertical se simuló aplicando una fuerza constante de 20 kN por medio de dos cilindros hidráulicos de simple-acción con capacidad de 50kN.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se adopta la siguiente nomenclatura para las seis pruebas realizadas.

- MS-O1 sin confinamiento, original.
- MC-O2 confinado, original.
- MS-F1 sin confinamiento, reforzado.
- MC-F2 confinado, reforzado.
- MS-P1 sin confinamiento, reparado.
- MC-P2 confinado, reparado.

Para los modelos MS-O1 y MS-P1 se utilizó el mismo muro debido a que primero se probó en su estado original y después se reparó, de igual manera para los modelos MC-O2 y MC-P2. Todos los modelos fueron ensayados ante cargas cíclicas. En cada caso, se obtuvo la gráfica de comportamiento histerético: carga en kN en el eje vertical y distorsión en el horizontal. Con ello se determinaron valores de las siguientes propiedades:

La ductilidad: es el cociente de la distorsión máxima que haya alcanzado el modelo y la distorsión donde se presentó la primera grieta. La disipación de la energía: es el área dentro de los lazos histeréticos de cada ciclo. La degradación de la capacidad: es el porcentaje de la disminución de la resistencia después de haber alcanzado su carga máxima con respecto al ciclo subsiguiente. La degradación de rigidez: la pendiente de la recta que une el inicio y el término de la rama de carga de un ciclo histerético. Se calcula la diferencia para ciclos consecutivos para la misma deformación, así como el cambio de la rigidez inicial respecto a la final.

Modelo MS-O1, la figura 2 muestra el comportamiento histerético, el comportamiento del muro fue elástico hasta una fuerza lateral de aproximadamente 20 kN con una distorsión de 0.0005 (0.05%). Los lazos histeréticos fueron simétricos y angostos dentro del rango lineal. Se pudo obtener un valor en ductilidad de 1.33. La degradación de capacidad fue de 9.52% en empuje, y de 6.5% en tracción.

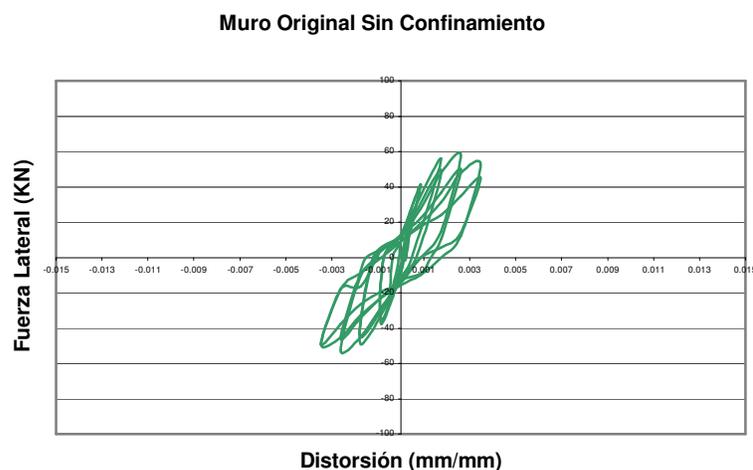


Figura 2: Comportamiento histerético del modelo MS-O1.

La degradación de la rigidez más significativa se calculó para el ciclo 9 y 10 y corresponde a un desplazamiento de 8mm (distorsión 0.35%). La degradación de rigidez fue de 14.04% en empuje y 0% en tracción. La pérdida de rigidez global fue de 65.0%. Durante el ensaye se formó un patrón de grietas bien definido con una inclinación de aproximadamente 50°. En la etapa inicial del ensaye se presentó una relación aproximadamente elástica -lineal entre la carga lateral y la distorsión. Este comportamiento se extendió hasta el ciclo 4. La primera grieta se presentó en el ciclo 6, después de este ciclo las grietas se extendieron rápidamente y el comportamiento dejó de ser elástico. Las grietas se abrieron aproximadamente de 1 a 7 mm.

Modelo MC-O2, la figura 3 muestra el comportamiento histerético, los ciclos de histéresis fueron simétricos dentro del rango lineal. Cuando se incurrió en el intervalo inelástico también hubo simetría y estabilidad en la amplitud de los ciclos, siendo estos relativamente angostos. Se obtuvo un valor en la ductilidad de 1.33. La capacidad de disipación de energía total acumulada fue de 2087.66 kN-mm. Se tiene una carga máxima en empuje de 66.13 kN con una distorsión de 0.35% (8mm), ésta fue la mayor carga registrada, el ciclo subsecuente no presenta disminución de capacidad por lo tanto no hay degradación de la capacidad en empuje. La degradación de capacidad fue de 4.73% en tracción.

La degradación de la rigidez más significativa se calculó para el ciclo 7 y 8 y corresponde a un desplazamiento de 6mm (distorsión 0.35%). La degradación de rigidez es de 3.2% en empuje y de 15.38% en tracción. La pérdida de rigidez global fue de 62.71%. El patrón de agrietamiento en este modelo resultó muy visible. La primera etapa de grietas se presentó en el ciclo 7. Cuando se le aplicó un desplazamiento de 6 mm en empuje (compresión), esta grieta fue diagonal y atravesó el muro. La segunda etapa de grietas se presentó en el ciclo 7 con una abertura de 0.6mm, estas fueron grietas verticales junto al castillo, en este mismo ciclo aparecieron otras grietas diagonales pero en dirección de

carga por tiro con una abertura de 0.5mm. La tercer etapa de grietas se presento en el ciclo 9, con un agrietamiento inclinado en la diagonal principal con una abertura de 1.5mm.

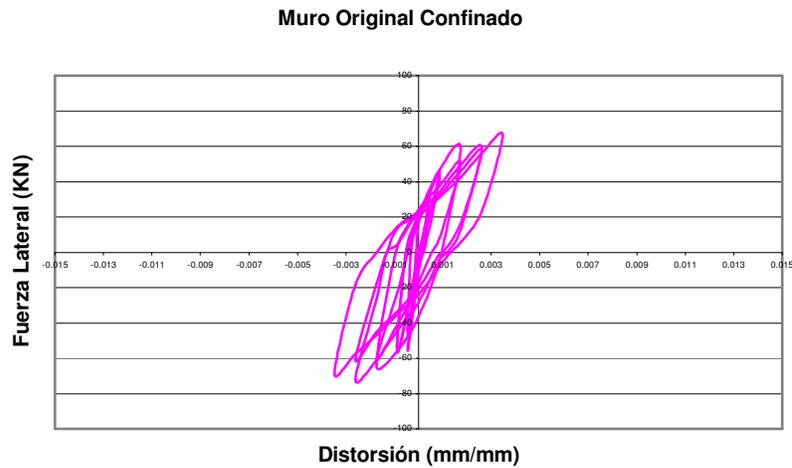


Figura 3: Comportamiento histerético del modelo MC-O2.

Modelo MS-F1, la figura 4 muestra su comportamiento histerético, los ciclos histeréticos son angostos en el rango inicial pero a medida que incrementa la deformación los ciclos histeréticos se hacen más amplios. La carga sigue incrementando a medida que aumenta el desplazamiento lateral. Este modelo pudo haber tenido mayor carga y desplazamiento lateral, pero se decidió suspender la prueba cuando se observó deformación del muro fuera de su plano ya que no se contó con elementos que restringieran estos movimientos para niveles altos de carga. El comportamiento resultó dúctil debido a que la primer grieta se presentó en el ciclo 8 con una distorsión de 0.0035 (deformación lateral de 8 mm) mientras que la prueba se llevó a una distorsión máxima de 0.0113 (deformación lateral de 26 mm), por lo tanto se tiene un valor de la ductilidad de 3.25. La energía total disipada durante la prueba fue de 4988.59 kN. La degradación de la capacidad de carga es nula debido a que en los ciclos subsecuentes no se presenta ninguna disminución de la resistencia.



Figura 4: Comportamiento histerético del modelo MS-F.

La degradación de la rigidez más significativa se calculó para los ciclos 5 y 6 y corresponden a un desplazamiento de 4 mm (distorsión 0.17%). Para empuje tuvo una fuerza lateral de 49.6 kN y 45.01 kN respectivamente, y para

tracción tuvo una fuerza de 44.84 kN y 45.69 kN respectivamente. Por la degradación de rigidez de 9.25% en empuje y un aumento de rigidez de 1.9% en tracción. La pérdida de rigidez global fue de 76.9%. A pesar de tener una alta degradación global de rigidez, el remanente permite nuevas aplicaciones de carga lo que impide una falla frágil, o sea se previene el colapso. Durante el ensaye se registraron las primeras grietas en la parte central del muro con una inclinación de aproximadamente 45°, esto se presentó en el ciclo 8, en el ciclo 13 aparecieron otras grietas aproximadamente verticales en los extremos del muro en la unión del muro de mampostería y el elemento distribuidor de carga que se colocó alrededor del muro. El modo de falla del modelo estuvo controlado prácticamente por compresión diagonal ya que sus grietas principales aparecieron en ese sentido.

Modelo MC-F2, la carga máxima de empuje fue de 83.59 kN la cual se presentó una distorsión de 0.0087, la carga máxima de tracción fue de 122.55 kN a una distorsión de 0.0113. En la figura 5 se puede observar que los ciclos histéreticos son amplios para niveles de deformación altos. Existe algo de asimetría, esto se atribuye a que a medida que incrementó la deformación se presentó una grieta diagonal siguiendo las juntas de mortero en forma de escalera, lo que hizo que en empuje disminuyera su resistencia por el efecto de la fricción. Sin embargo, a partir de dicho agrietamiento los lazos de histéresis son más amplios y reflejan una alta capacidad de disipación de energía. El modelo presentó un comportamiento dúctil, con un valor de 7.5. La capacidad de disipación de energía total acumulada fue de 24983.622 kN-mm, que resulta mayor que en los otros modelos. La mayor degradación de capacidad entre ciclos consecutivos corresponde a un 4.4% en empuje, en tracción fue de 6.97%.

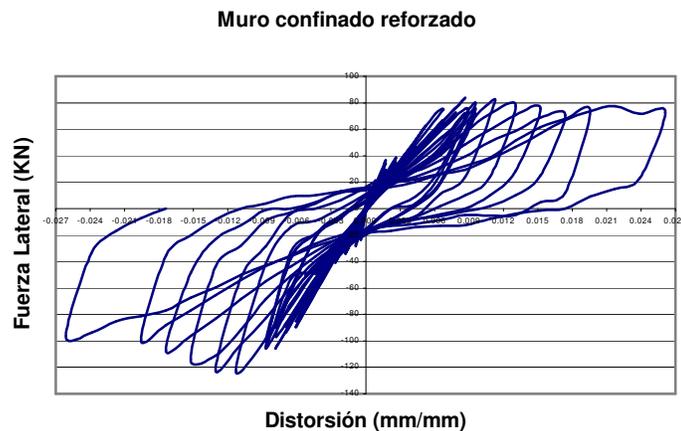


Figura 5: Comportamiento histéretico del modelo MC-F2.

La degradación de la rigidez más significativa se calculó para los ciclos 25 y 26 se obtuvo una degradación de rigidez de 3.79% en empuje y 6.37% en tracción. Una pérdida de rigidez global de 43.12%. Las primeras grietas se presentaron a una deformación lateral de 8 mm, se presentaron principalmente en empuje con un ancho de 0.5 mm. Cabe mencionar que las grietas en este modelo se cerraban totalmente después de retirarle la carga, dichas grietas llegaron a tener hasta 15 mm de ancho. Sin embargo el muro mantuvo su integridad, no se presentaron fallas locales ni desmoronamientos. Las grietas se extendieron a los castillos tratando de desprenderse las esquinas del muro. La figura 3.31 muestra como se presentó la grieta diagonal en forma de escalera extendiéndose después por los extremos del muro.

Modelo MS-P1, la figura 6 muestra su comportamiento histéretico. Los lazos de histéresis son amplios. Desde el inicio mostraron un comportamiento inelástico. En los ciclos subsecuentes se observa en empuje que la amplitud de los ciclos va en aumento y son relativamente más amplios en empuje que en tracción, esto se debe a que el comportamiento del muro estuvo regido por el sentido en que se presentó la primera grieta en el muro original. El modelo presentó un comportamiento dúctil, el valor de la ductilidad fue de 4.5. A pesar de que el modelo ya había sido llevado a una condición cercana a la falla, después de aplicar la técnica de refuerzo pudo llevarse hasta una distorsión de 0.0113 (26mm). Se observó que las grietas no aumentaron en extensión con respecto a la prueba original, únicamente se abrían y cerraban cuando se les aplicó la carga a desplazamientos crecientes. Al final de la prueba estas grietas se extendieron a los castillos y dadas dejando como una placa rígida al muro. La capacidad de disipación de energía total acumulada fue importante, con un valor de 11709.9 kN-mm. La degradación de capacidad corresponde a un 12.00% en empuje, en tracción no presenta disminución de capacidad.

La degradación de la rigidez más significativa se calculó para el ciclo 9 y 10, se obtuvo una degradación de rigidez de 4.65% en empuje y un aumento de rigidez de 0.94% en tracción. Una pérdida de rigidez global de 54.86%. Para este modelo se pudo observar que las grietas presentaron un patrón similar a lo observado en el modelo MS-O1. En este caso

se presentó de forma más acusada una separación del muro en su hilada inferior que sufría deslizamiento creciente a medida que se aplicaba más carga. Este deslizamiento, y por lo tanto la fricción, fue mayor en la dirección de empuje lo cual explica en parte la asimetría del comportamiento histerético. Las grietas se extendieron a los castillos en las últimas etapas de carga.



Figura 6: Comportamiento histerético del modelo MS-P1.

Modelo MC-P2, la figura 7 muestra que los ciclos histeréticos fueron relativamente amplios y con distribución simétrica, los ciclos muestran menor estrangulamiento que el caso anterior, por lo cual presentó mayor disipación de energía. Al igual que el modelo anterior, éste también presentó una ductilidad grande de 3.7. Esto a pesar de que ya había sido llevado a niveles cercanos a la falla en la prueba original. La capacidad de disipación de energía total acumulada fue importante, con un valor de 12253.32 kN-mm. La degradación de capacidad corresponde a un 2.30% en empuje, en tracción no presenta disminución de capacidad por lo tanto no hay degradación de la capacidad. La degradación de la rigidez más significativa se calculó para el ciclo 5 y 6, se obtuvo una degradación de rigidez de 2.23% en empuje y 0.70% en tracción. Se tuvo una pérdida de rigidez global de 63.7 %. En este modelo las grietas permanecieron en la misma disposición que en el modelo original, únicamente se abrieron más y después del ciclo 12 las grietas comenzaron a extenderse hacia los castillos y dalas.



Figura 7: Comportamiento histerético del modelo MC-P2.

La tabla 1 muestra el resumen de los resultados de los modelos estudiados.

Comparación de resultados

Modelos MS-01 y MS-F1, existe un incremento de capacidad de 49% y un incremento en deformación de 285%. La figura 8 muestra las curvas envolventes de estos dos modelos. Se presento una relación de incremento de ductilidad de 2.50, o sea, un aumento del 150%.

La energía disipada del modelo MS-O1 para llevarla a una condición cercana a la falla fue de 2376 kN-mm mientras que para el modelo MS-F1 también para llevarlo a una condición cercana a la falla la energía disipada fue de 4988 kN-mm, esto quiere decir, que la técnica de refuerzo aumenta considerablemente, 2.1 veces, la capacidad de disipación de energía, o un aumento del 110%. El modelo MS-F1 cumple con el objetivo de la técnica como es el aumento de la capacidad de carga (49%) y el incremento de la ductilidad. Comparando el esfuerzo máximo a cortante de los muros con los valores obtenidos en los muretes (etapa 1 y 2), se tiene que la relación de incremento de capacidad con respecto al muro original es de 1.49 para la técnica TR2 que se aplicó al modelo MS-F1, mientras que en los muretes la relación de incremento en capacidad fue de 2.45 para la primera etapa y de 1.31 para la segunda etapa, como se había observado en las pruebas de muretes también en la prueba de los muros se manifiesta el incremento de capacidad, además se tiene un considerable incremento en la ductilidad y en la capacidad de disipación de energía. Existe una correlación razonable sobre todo con el resultado de la segunda etapa por lo que la prueba de muretes (en número suficiente) permite tener un estimado razonable de la capacidad, lo cual valida los resultados de las primeras dos etapas.

Tabla 4: Resumen de los resultados de la tercera etapa.

Modelo	Ductilidad	Disipación de energía (kN-mm)	Degradación de capacidad		Degradación de rigidez		Degradación de rigidez global %
			Empuje %	Tracción %	Empuje %	Tracción %	
MS-O1	1.33	1753.27	-9.52	-6.50	-14.04	0.00	-65.00
MC-O2	1.33	2087.66	0.00	-4.73	-3.20	-15.38	-62.71
MS-F1	3.25	4988.59	0.00	0.00	-9.25	1.90	-76.90
MC-F2	7.50	24983.62	-4.40	-6.97	-3.79	-6.37	-43.12
MS-P1	4.50	11709.90	-12.00	0.00	-4.65	0.94	-54.86
MC-P2	3.70	12252.32	-2.30	0.00	-2.23	0.70	-63.70

Nota: el signo negativo indica un decremento, el signo positivo indica un aumento.

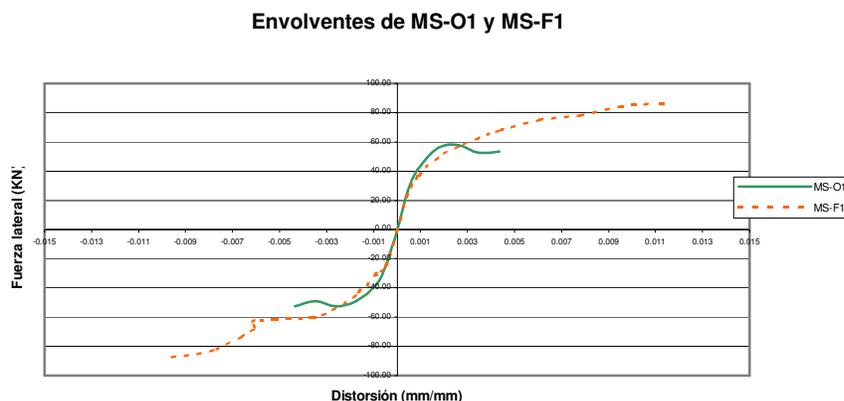


Figura 8: Comparación de envoltentes de los modelos MS-O1 y MS-F1.

Modelos MS-01 y MS-P1, existe un incremento de capacidad de 59% y un incremento en deformación de 135% del modelo reparado con respecto al modelo original. La figura 9 muestra las curvas envolventes del comportamiento de estos dos modelos, donde se puede observar claramente la diferencia en el comportamiento global del muro reparado y original. Resulta evidente que la técnica mejora las condiciones del modelo original que es lo que se busca en las técnicas de reparación. Con respecto a la ductilidad, existe una relación de incremento de ductilidad de 3.38, un

aumento del 238%. La técnica de reparación aumenta considerablemente la capacidad de disipación de energía, siendo esta una relación de 4.93 veces. Se puede decir que una estructura dañada a la cual se aplique esta técnica tendrá un comportamiento sísmico mejor que la estructura original y será capaz de resistir sismos de mayor intensidad.

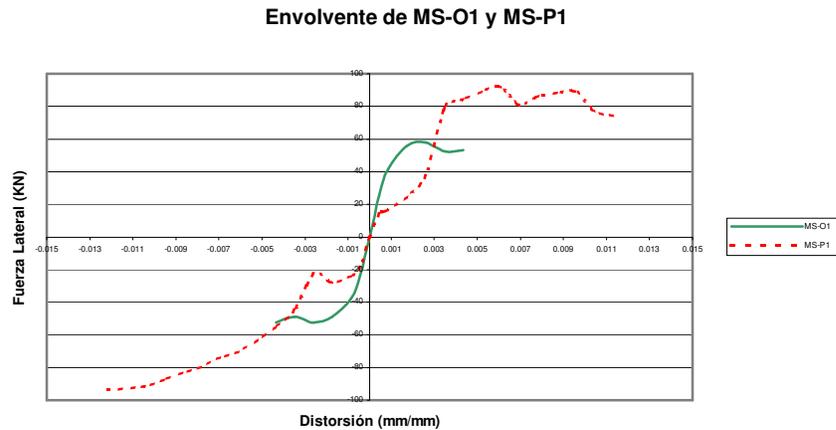


Figura 9: Comparación de envolventes de los modelos MS-O1 y MS-P1.

La relación de incremento de capacidad con respecto al muro original es de 1.59 para la técnica TR9 que se aplicó al modelo MS-P1, mientras que en los muretes la relación de incremento en capacidad fue de 2.16 para la primera etapa y de 2.17 para la segunda etapa, por lo cual se puede concluir que como se había observado en las pruebas de muretes también en la prueba de los muros se manifiesta el incremento de capacidad, además se tiene un considerable incremento en la ductilidad y en la capacidad de disipación de energía.

Modelos MS-F1 y MS-P1, existe un incremento de capacidad de 6.4% mayor en reparación pero en distorsión el modelo MS-F1 tiene un incremento de 85 % con respecto al modelo MS-P1. La figura 10 muestra las curvas envolventes del comportamiento de estos dos modelos, se puede observar un comportamiento similar entre las técnicas de reparación y refuerzo aplicada a muros sin confinamiento.

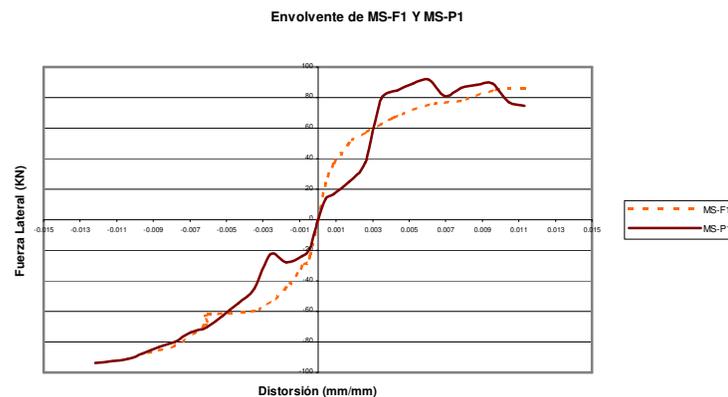


Figura 10: Comparación de envolventes de los modelos MS-F1 y MS-P1.

Existe una relación de incremento de ductilidad de 1.38, un aumento del 38%. La técnica de reparación aumenta considerablemente la capacidad de disipación de energía, siendo esta una relación de 2.35 veces. La degradación de la capacidad en el modelo MS-F1 fue de 0% en empuje y 0% en tracción, para el modelo MS-P1 tuvo una degradación de la capacidad en empuje de 12.0% y de 0% en tracción. La degradación de rigidez para el modelo MS-F1 fue de 9.25% en empuje y en tracción fue de 1.9%, en el modelo MS-P1 se presentó una degradación de 4.65% en empuje y de 0% en tracción. Con respecto a los muretes se puede observar que en las pruebas de los muros sin confinamiento también se refleja el incremento de la capacidad tanto en reparación como en refuerzo, teniendo que para reparación hubo un incremento de capacidad de 1.59 con la técnica TR9 y de 1.49 con la técnica TR2.

Modelos MC-02 Existe un incremento de capacidad de 26% y un incremento en deformación de 150%, con respecto al modelo original. La figura 11 muestra las curvas envolventes de estos dos modelos.

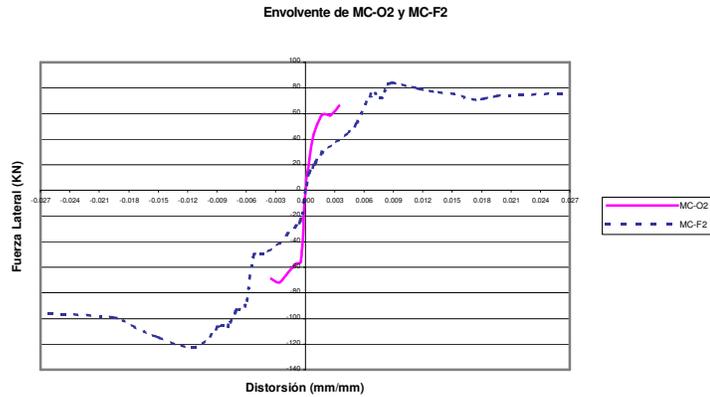


Figura 11: Comparación de envolventes de los modelos MC-O2 y MC-F2.

La técnica de refuerzo aumenta considerablemente la capacidad de disipación de energía, siendo ésta una relación de 11.97 veces. Calculando el esfuerzo máximo a cortante de los muros para hacer la comparación de los valores obtenidos con los muretes, se tiene que la relación de incremento de capacidad con respecto al muro original es de 1.26 para la técnica TR2 que se aplicó al modelo MC-F2, mientras que en los muretes la relación de incremento en capacidad fue de 2.45 para la primera etapa y de 1.31 para la segunda etapa, por lo cual se puede concluir que como se había observado en las pruebas de muretes también en la prueba de los muros se manifiesta el incremento de capacidad, además se tiene un considerable incremento en la ductilidad y sobre todo en la capacidad de disipación de energía.

Modelos MC-O2 y MC-P2, existe un incremento de capacidad de 21% y un incremento en deformación de 100%, con respecto al modelo original, además existe una relación de incremento de ductilidad de 2.78, un aumento del 178%. La figura 12 muestra las curvas envolventes del comportamiento de estos dos modelos. La técnica de reparación aumenta considerablemente la capacidad de disipación de energía, siendo esta una relación de 5.87 veces más que el muro original. Aquí se confirma que la técnica de reparación además de recuperar las características originales del muro, las incrementa en más de 25%.

La degradación de la capacidad en el modelo MC-O2 fue de 0% en empuje y 4.73% en tracción, para el modelo MC-P2 tuvo una degradación de la capacidad en empuje de 2.3% y de 0% en tracción. La degradación de rigidez para el modelo MC-O2 fue de 3.11% en empuje y 15.38 en tracción, en el modelo MC-P2 se presentó una degradación de 2.23% en empuje y de 0.7% en tracción. Calculando el esfuerzo máximo a cortante de los muros para hacer la comparación de los valores obtenidos con los muretes, se tiene que la relación de incremento de capacidad con respecto al muro original es de 1.21 para la técnica TR9 que se aplicó al modelo MC-P2, mientras que en los muretes la relación de incremento en capacidad fue de 2.16 para la primera etapa y de 1.96 para la segunda etapa, por lo cual se puede concluir que como se había observado en las pruebas de muretes también en la prueba de los muros se manifiesta el incremento de capacidad, además se tiene un considerable incremento en la ductilidad y en la capacidad de disipación de energía.

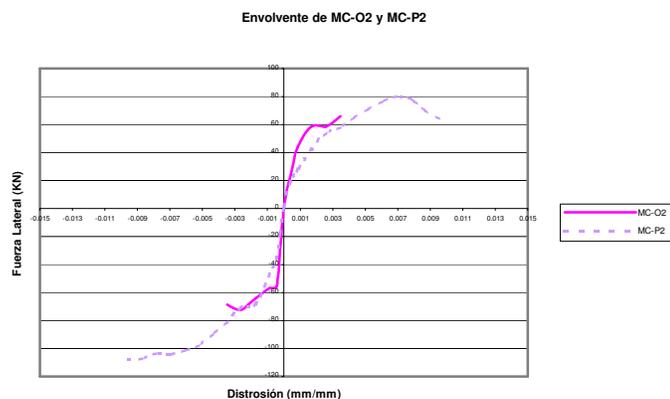


Figura 12: Comparación de envolventes de los modelos MC-O2 y MC-P2.

Modelos MC-F2 y MC-P2, se presentó un incremento de capacidad de 4.6% mayor en refuerzo (MC-F2) en distorsión el modelo MC-F2 tiene un incremento de 24 % con respecto al modelo MC-P2. La figura 13 muestra las curvas envolventes del comportamiento de estos dos modelos, se puede observar que la técnica de refuerzo representa un comportamiento más dúctil pero capacidad similar a la de reparación. Existe una relación de incremento de ductilidad del modelo MC-F2 de 2.70, un aumento del 170%. La energía disipada del modelo MC-F2 fue de 24983.62 KN-mm, mientras que para el modelo MC-P2 fue de 12253.32 KN-mm, esto quiere decir, que la técnica de refuerzo aumenta la capacidad de disipación de energía, siendo esta una relación de 2.04 veces. La degradación de la capacidad en el modelo MS-F1 fue de 0% en empuje y 0% en tracción, para el modelo MS-P1 tuvo una degradación de la capacidad en empuje de 12.0% y de 0% en tracción. La degradación de rigidez para el modelo MS-F1 fue de 9.25% en empuje y en tensión fue de 1.9%, en el modelo MS-P1 se presentó una degradación de 4.65% en empuje y de 0% en tracción. A pesar de tener degradación de rigidez en las dos técnicas, el remanente permite nuevas aplicaciones de carga lo que impediría una falla frágil en ambas técnicas.

La tabla 3.2 muestra un resumen de las comparaciones que se determinaron en la tercera etapa, estos incrementos se calcularon con respecto a los modelos originales.

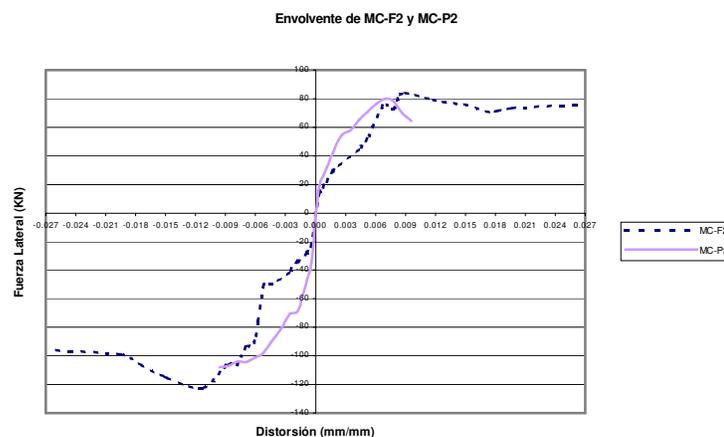


Figura 13: Comparación de envolturas de los modelos MC-F2 y MC-P2.

Tabla 5: Resumen de la comparación de resultados.

	Muros sin confinamiento		Muros confinados	
	TR2	TR9	TR2	TR9
Incremento de resistencia	1.49	1.59	1.26	1.21
Capacidad de deformación	3.85	2.35	2.50	2.00
Incremento de ductilidad	2.50	3.38	7.52	2.78
Disipación de energía	2.10	4.93	11.97	5.87

Los resultados encontrados se compararon con los correspondientes a estudios previos sobre muros de mampostería dañados. Pineda (1996) y Zepeda (1997) reportan datos de muros reparados con encamisado con mallas electrosoldadas, Alcocer (2002) reporta datos referentes a diferentes técnicas de refuerzo. Fancher (1997) reporta datos de reparación de muros con inyección de resinas y con fibras de materiales compuestos, Ehsani y otros (1997) evalúan el esfuerzo cortante en elementos reforzados con fibras compuestas, Lissel y Gayeroy (2003) hacen un reporte del estado del arte del uso de fibras FRP para reparar y reforzar muros de mampostería. Con base en esta información y consultando con expertos en la aplicación de técnicas de reparación para estimar los costos respectivos (a septiembre 2003) se preparó la tabla 6 que muestra comparación de los diferentes métodos de reparación en cuanto a los rangos más importantes del comportamiento, así como del costo relativo de intervención al costo de reposición de un muro dañado (incluye costos de: demolición, disposición de escombros y construcción de muro nuevo).

Al comparar con las técnicas aquí propuestas utilizando flejes metálicos y de plástico, se puede observar que el encamisado permite incrementos mayores de capacidad y de rigidez, pero no así en ductilidad, pero a costos mayores.

La inyección de grietas no superan los parámetros de comportamiento, además su costo resulta mucho mayor. Con las fibras FRP si se pueden obtener resistencias mayores pero no así rigidez y ductilidad, además los costos son bastante mayores. Se puede establecer que las técnicas aquí propuestas tienen potencial para su aplicación en edificios para vivienda y otros usos en localidades de bajos recursos que son comunes en México y otros países de América.

Tabla 6: Comparación con otros métodos.

Método	Comportamiento			Costo respecto al de reposición
	Capacidad	Rigidez	Ductilidad	
Flejes	1.21-1.59	0.8-1.0	2.5-7.52	0.3-0.44
Encamisado	1.2-2.0	1.2-1.4	2.0-2.5	0.8-1.4
Inyección	0.8-1.0	0.8-1.0	0.9-1.2	1.0-2.0
Fibras de Vidrio	1.2-2.0	0.8-1.0	0.9-1.2	1.0-1.4
Fibras de Carbono	1.3-2.5	0.8-1.0	0.9-1.0	1.8-2.2

CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de flejes metálicos o de plástico con las técnicas aquí propuestas, se logra un confinamiento que permite a los muros con daños previos recuperar o incrementar su capacidad mejorando sustancialmente la capacidad de disipación de energía y de deformación, así mismo, permite a los muros propensos a sufrir daños aumentar su capacidad y ductilidad.

De la primera etapa, se determinaron las tres mejores técnicas que son: Para reparación TR2, TR9 y TR10; para refuerzo: TR2, TR4, TR10. En la segunda etapa se realizaron pruebas adicionales sobre las tres mejores técnicas, con ello fue posible proponer un criterio básico de diseño. Para mayores detalles consultar, Ramírez (2002) y Carreón (2003)

Se pudieron comprobar los resultados de las etapas uno y dos respecto a la tercera, en cuanto a la capacidad esperada de cada técnica. La aplicación de cargas cíclicas permitió conocer el comportamiento histerético de las técnicas TR2 y TR9, se logran incrementos en: la capacidad de carga para muros sin confinamiento reforzados con la TR2 y reparados con la TR9, mayor capacidad de disipación de energía respectivamente, así mismo se presenta menor degradación de rigidez respectivamente, todos con respecto al muro original sin confinamiento. La capacidad de carga para muros confinados reforzados con la TR2 y reparados con la TR9 alcanzaron un relación de incremento de resistencia (1.26, 1.21) veces respectivamente, una capacidad de deformación de(2.50,2.0) respectivamente, un incremento en la ductilidad de (7.52, 2.78) respectivamente, mayor capacidad de disipación de energía con una relación de (11.97, 5.87) respectivamente, así mismo se presenta menor degradación de rigidez con un relación de (2.5, 1.4) respectivamente, todos con respecto al muro original confinado. Se observó correlación entre las pruebas de muros y sus correspondientes pruebas en muretes, por lo que se puede establecer que si se quiere estudiar una técnica diferente se podría tener una buena idea de su efectividad a través de pruebas de muretes que son mucho más económicas que las de muros. En este trabajo se mostró que los métodos propuestos aquí descritos e investigados, tienen aplicación potencial para reparar las estructuras dañadas y disminuir la vulnerabilidad de la vivienda existente a bajo costo.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo de CONACYT como parte del proyecto “Vulnerabilidad sísmica en ciudades medias” con número de referencia 33699-U. La beca otorgada a B. Bricia Carreón Guardado para la elaboración de su tesis de maestría forma también parte de este apoyo. El trabajo experimental fue llevado a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería UAEM, se agradece su valioso apoyo a los encargados y trabajadores y un reconocimiento especial al Ingeniero Fernando Vera Noguez por su valioso apoyo a este proyecto.

REFERENCIAS

- Alcocer, Sergio. (2002). Capítulo 10, *Rehabilitación de estructuras de mampostería, en Edificaciones de Mampostería para vivienda*. Editor De la Torre Rancel. Fundación ICA y Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. México.
- Carreón Guardado, B. (2003). “Reparación y refuerzo de muros de mampostería de tabique de arcilla para vivienda de bajo costo”. Tesis de Maestría- Estructuras. UAEM, México.
- De la Torre Rangel, O. (1999). *Edificaciones de mampostería para vivienda*, Fundación ICA. México.
- Ehsani, M; Saadatmanesh H. y Al-Saidy A., (1997). “Shear Behavior of URM retrofitted FRD overlays”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE 1 (1), 17-25.
- Fancher, (1997). “External strengthening with FRP composites”, *Concrete Repair Bulletin*, International Concrete Repaire Institute. 16-21.

- Iglesias Jiménez, J., Iglesias Villareal, J., Ramírez, M., Gómez, B., Guerrero, J., Ruiz, C. and Salgado, I. (1999), "Mapa de intensidades del sismo del 15 de Junio de 1999", *Proceedings of the XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, México, Vol. II, 744-749
- Lissel, S.L. and Gayevoy, A. (2003). "The use of FRPS in Masonry: A state of the art review". *ICPCM – A New Era of Building*. Cairo, Egipto.
- NTCM (1993) *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Mampostería*, México.
- Pineda, J.A. (1996). "Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada". Tesis de Maestría UAEM, México.
- Ramírez, H; Carreón, B. (2002) "Reparación y Refuerzo de muros de mampostería de tabique de arcilla para vivienda de bajo costo". *XIII Congreso Nacional de Ingeniería estructural*, Puebla, México.
- Salas Serrano, J. (1992), *Contra el hambre de vivienda*, Escala Colombia
- Sordo, E., Gómez, A., Juárez, H., Gama, A., Guinto, E., Vera, R., Mendoza, E., Alonso, G., Alvarez, S., Barrios, T. and Suguía, J. (1995), "The September 14th, 1995, Ometepec, Mexico Earthquake", *Special report, Earthquake Engineering Research Institute*, Oakland California USA.
- Zepeda Ramos, J.A., Pineda Cruz, J.A., Alcocer Martínez de Castro S.M., (1997). "Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada" *Reporte de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres*, México.