

REHABILITACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA MEDIANTE MALLA DE ALAMBRE Y RECUBRIMIENTO DE MORTERO

Jorge Ruiz García¹, Tomás Sánchez Pérez², Sergio M. Alcocer Martínez de Castro²

¹ División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM
Circuito Escolar, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F.

² Centro Nacional de Prevención de Desastres
Delfin Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Sto. Domingo, México, 04360, México, D.F.

RESUMEN

En base a los resultados experimentales obtenidos en diversos programas de investigación llevados a cabo en Latinoamérica, en este artículo se presentan algunas recomendaciones para la evaluación, diseño y construcción de estructuras a base de muros de mampostería confinada que han sufrido daño del tipo sísmico y son sometidos a un proceso de rehabilitación mediante el uso de malla de alambre electrosoldada recubierta con mortero de cemento. Este método de rehabilitación, aplicado correctamente, permite aumentar la resistencia ante cargas laterales, incrementar la rigidez remanente, así como la capacidad de deformación y disipación de energía.

SUMMARY

Based on the main experimental results obtained from several research programs in Latin America, some qualitative and quantitative suggestions to evaluate, design and to carry out the construction process using welded wire mesh as a retrofit technique of confined masonry walls are presented. This retrofit scheme increases the shear strength, residual stiffness, deformation and energy dissipation capacities on severely damage masonry walls.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la investigación acerca de las técnicas de reparación y refuerzo de estructuras de mampostería, ha tenido gran aceptación en México y otros países. Ello se debe a la necesidad de *rehabilitar*, en la mayoría de los casos, edificaciones urbanas de carácter histórico y habitacional que han sufrido daño por el efecto destructivo de los sismos. Para fines de este estudio, se define como *rehabilitación* al proceso de recuperación y mejoramiento de las características originales de una estructura o elementos constitutivos, para devolver o incrementar su funcionalidad y seguridad estructural ante eventos sísmicos futuros. Ante este panorama, en México y otros países latinoamericanos se han desarrollado programas de investigación para evaluar la factibilidad y eficiencia de diversas propuestas de rehabilitación para edificaciones a base de muros de mampostería confinada. Entre las propuestas de rehabilitación se encuentran el relleno de las grietas principales, el empleo de acero de refuerzo en forma de grapas a lo largo del agrietamiento principal, la inserción y anclaje de alambres de acero en ranuras practicadas a lo largo de las juntas horizontales, así como el uso de malla de alambre anclada a los muros y recubierta con mortero de cemento. En una revisión de la literatura existente sobre el comportamiento experimental de estas técnicas, se exponen las ventajas que ofrece la adición de malla de alambre electrosoldada recubierta con mortero sobre otros esquemas de rehabilitación para muros de mampostería confinada con un grado de daño moderado o severo (Ruiz, 1995). Este método de rehabilitación, aplicado correctamente, permite aumentar la resistencia ante cargas laterales, incrementar la *rigidez remanente*, así como la capacidad de deformación y disipación de energía.

No obstante la evidencia experimental y el amplio uso que ha tenido en la práctica profesional, en la normatividad vigente no se cuenta con recomendaciones para la elección y correcta aplicación de los métodos descritos en la

literatura técnica, ni tampoco criterios para el análisis y diseño de la rehabilitación de estructuras dañadas por sismo. Por ello, el principal objetivo de este artículo consiste presentar los resultados más importantes obtenidos de diversos programas de investigación, dirigidos a evaluar el comportamiento de muros de mampostería confinada rehabilitados con malla de alambre y, en base a éstos, sugerir recomendaciones para la evaluación y la estimación de la capacidad ante cargas laterales que proporciona este método, así como aportar recomendaciones del proceso constructivo a seguir.

COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REHABILITADOS CON MALLA DE ALAMBRE Y RECUBRIMIENTO DE MORTERO

El uso de malla de alambre recubierta con mortero de cemento como técnica de rehabilitación, ya sea como reparación o refuerzo, ha sido evaluada experimentalmente en muros construidos con ladrillos cerámicos industrializados con perforaciones (tipo rejilla) y piezas macizas hechos a mano (tipo artesanal), así como en bloques de concreto. Usualmente, las pruebas se efectuaron en muros aislados a escala natural, ante carga estática y cíclica alterna, en México y otros países latinoamericanos como Chile y Argentina (Hernández, 1981; Delfin *et al*, 1991; Delfin *et al*, 1992). En México se llevo a cabo el ensaye ante cargas cíclicas alternadas de un modelo tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural, reparado y reforzado utilizando esta técnica (Ruiz, 1995). Con el fin de estudiar y evaluar los factores que influyen en el comportamiento de los muros rehabilitados se han utilizado como variables: el tipo de refuerzo, el tipo y método de aplicación del recubrimiento, el grado de daño, la cuantía del refuerzo horizontal y la densidad de anclajes para sujetar la malla al muro de mampostería. En la Tablas 1 y 2 se presenta un resumen de los programas experimentales, así como de las características del refuerzo, el recubrimiento empleado y el grado de recuperación alcanzado para muros construidos con piezas macizas del tipo artesanal y piezas del tipo extruido, respectivamente. Los resultados mas relevantes de estos estudios se comentan a continuación:

TABLA 1. Resultados obtenidos en muros de mampostería confinada construidos con piezas macizas tipo artesanal

Referencia	Espécimen	Grado de Daño	Tipo de Recubrimiento (Aplicación)	Tipo de refuerzo	ρ_h (%)	V_R/V_O	R_R/R_O
Hernández (1981)	M-1	Severo	MC (manual)	malla de alambre	0.08	2.28	---
	M-2	Severo	MC (manual)	electrosoldada	0.16	2.24	---
Delfin <i>et al</i> (1991)	M-O	Sin daño	MC (lanzado)		0.3	---	---
	M-1	Moderado	MC (manual)	malla de alambre	0.3	1.89	---
	M-2	Moderado	MC (lanzado)	electrosoldada	0.3	1.69	---
	M-3	Severo	MC (lanzado)	$\phi = 4.2$ mm	0.3	1.35	---
	M-4	Severo	MC (lanzado por dos caras)		0.6	2.07	---
Ruiz (1995)	3DR	Severo	MC (manual)	malla de alambre (6x6/10-10)	0.49	1.64	2.5

Notación:

R	Distorsión = Desplazamiento lateral/Altura del espécimen	MC	Mortero de cemento
V_R	Resistencia ante cargas laterales del espécimen rehabilitado	ϕ	Diámetro
V_O	Resistencia ante cargas laterales del espécimen original		
R_R	Distorsión correspondiente a la resistencia del espécimen rehabilitado		
R_O	Distorsión correspondiente a la resistencia del espécimen original		

Hernández (1981). La calidad del recubrimiento y el tipo de refuerzo fueron las variables consideradas en una serie

de cinco muros construidos con dos tipos de piezas. En los muros construidos con tabique extruido se observó que el recubrimiento se despegó de la mampostería a distorsiones del orden de 0.40%, provocando que la malla se desligara sobre la diagonal a compresión y, por consiguiente, no se alcanzara la resistencia del espécimen original. En el primer y segundo muros reparados se restituyó la rigidez original, mientras que en el tercero no se alcanzó, dado que el aplanado original (de yeso) era de mayor resistencia que el empleado en la reparación (yeso y cemento) para cubrir la malla. En promedio, los muros reparados aumentaron en 64% su capacidad de deformación. Dos muros construidos con tabique tipo artesanal fueron reforzados con malla de alambre electrosoldado y ensayados ante cargas laterales cíclicas reversibles. En promedio, la resistencia de los muros reparados fue superior en 2.26 veces respecto a los muros originales.

TABLA 2. Resultados obtenidos en muros de mampostería confinada construidos con piezas del tipo extruido

Referencia	Espécimen	Grado de Daño	Tipo de Recubrimiento (Aplicación)	Tipo de Malla	ρ_h (%)	V_R/V_O	R_R/R_O
Hernández (1981)	M-1	Severo	Yeso común	Gallinero	0.08	0.92	0.99
	M-2	Severo	Yeso y cemento	Trenzada	0.10	0.79	1.90
	M-3	Severo	Yeso y cemento	Gallinero	0.08	0.82	2.03
Delfín et al (1991)	M-0	Sin daño	MC (lanzado)	malla de alambre electrosoldada $\phi = 4.2$ mm	0.3	---	---
	M-1	Moderado	MC (manual)		0.3	0.96	---
	M-2	Severo	MC (manual)		0.3	1.18	---
	M-3	Moderado	MC (lanzado)		0.3	1.16	---
	M-4	Severo	MC (lanzado)		0.3	1.48	---
M-5	Severo	MC (lanzado por dos caras)	0.6	1.96	---		

Notación:

R Distorsión = Desplazamiento lateral/Altura del espécimen
 V_R Resistencia ante cargas laterales del espécimen rehabilitado
 V_O Resistencia ante cargas laterales del espécimen original
 R_R Distorsión correspondiente a la resistencia del espécimen rehabilitado
 R_O Distorsión correspondiente a la resistencia del espécimen original

MC Mortero de cemento
 ϕ Diámetro

Delfín, Astroza, Águlla, Sepúlveda (1991). El nivel de daño del muro por reparar y el método de aplicación del recubrimiento (manual o neumático) fueron las variables estudiadas por Delfín y colaboradores (1992) mediante el ensaye de once especímenes a escala natural construidos con ladrillos cerámicos de arcilla perforados hechos a máquina (tipo rejilla) y sólidos hechos a mano (tipo artesanal). Se utilizó mortero de cemento como recubrimiento, con espesor de 4 a 5 cm, en cada lado del muro. Al comparar dos muros construidos con ladrillo macizo del tipo artesanal y reparados con el mismo grado de daño (moderado), se puede observar que la resistencia en el muro rehabilitado aumentó en 89%, cuando se aplicó mortero en forma manual, y en 69% cuando se aplicó mortero lanzado, respecto a los muros originales. El mortero aplicado en forma neumática aumentó la resistencia en un muro construido con ladrillo del tipo cerámico respecto a otro con el recubrimiento aplicado en forma manual (con igual grado de daño), en 16%. En los muros construidos con ladrillo macizo, la resistencia del muro rehabilitado con malla por ambos lados fue de 2.1 veces la del muro original, mientras un muro rehabilitado con malla por un lado aumentó la resistencia en 1.35 veces.

Ruiz (1995). Como parte de un extenso programa de investigación sobre la seguridad estructural de la vivienda económica en México, se llevó a cabo el ensaye destructivo de una estructura tridimensional de dos niveles a escala natural, construida de mampostería confinada con piezas macizas de barro recocido (modelo 3D). El modelo original exhibió un grado de daño que puede considerarse como severo para este tipo de estructuras. Posteriormente, fue rehabilitado empleando malla de alambre electrosoldada recubierta con mortero de cemento (modelo 3DR) y re-ensayado hasta la falla. Antes de la colocación de la malla, se puso especial cuidado en la restauración de los

castillos y en la preparación de la superficie de los muros de mampostería. En las caras exteriores de los paneles de mampostería del primer nivel se colocó malla de alambre electrosoldada (con denominación comercial 6X6/10-10). Cada cara consistía de un panel con relación de aspecto $H/L = 1$ y 1.5 (donde H es la altura y L es la longitud). La malla de alambre se ancló al muro de mampostería con clavos para madera de 5 cm de longitud y corcholatas comunes. Los clavos se introdujeron en la mampostería alrededor de 4 cm y fueron doblados por la “cabeza” para fijar la malla. De esta manera, la variable en estudio fue el número de anclajes por unidad de área (6 anclajes/m² en la cara Sur y 9 anclajes/m² en la cara Norte). El recubrimiento consistió en una mezcla de cemento-arena (con proporción 1:3 en volumen) de 2.5 cm de espesor. La malla de alambre y el recubrimiento de mortero solo se colocó en los muros paralelos a la dirección de aplicación de carga del primer nivel. No se realizó ningún proceso de reparación en los muros longitudinales del segundo nivel, muros cabeceros, dadas o losas. Ambas estructuras fueron ensayadas ante cargas laterales cíclicas alternadas. Los detalles del diseño y construcción del proceso de rehabilitación así como de la instrumentación y ensaye destructivo del modelo rehabilitado pueden encontrarse en Ruiz (1995). Al final del ensaye destructivo pudo apreciarse que la rehabilitación permitió distribuir el agrietamiento de la planta baja de manera uniforme, contrario al típico patrón de grietas inclinadas concentradas sobre la diagonal de los paneles de mampostería observado en el modelo original. No obstante, el modo de falla del 3DR fue controlado por las deformaciones por corte. En la Fig. 1 se muestra el patrón final de agrietamiento para los modelos 3D y 3DR.

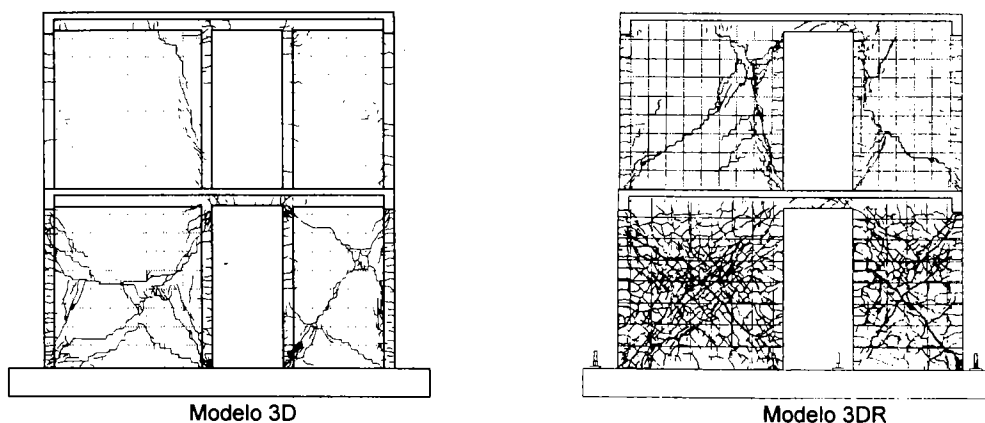


FIGURA 1. Patrón final de agrietamiento: (a) Modelo 3D ; (b) Modelo 3DR

Capacidad ante cargas laterales. El uso de la malla de alambre recubierta con mortero de cemento permitió recuperar e incrementar la capacidad ante cargas laterales del espécimen original. Tanto en el espécimen original (3D) como en el rehabilitado (3DR), la resistencia ante cargas laterales calculada con la normatividad vigente (DDF, 1993), y considerando un factor de reducción de resistencia unitario, fue superada por la obtenida en los ensayos de laboratorio en 1.36 y 2.32 veces, respectivamente. La resistencia del 3DR fue 1.64 veces, en promedio, a la medida en el 3D, permitiendo grandes desplazamientos antes de ocurrir el deterioro en su capacidad ante cargas laterales. Es interesante notar que para el nivel de distorsión del primer nivel, $R1$, asociado a la resistencia del 3D (0.36%), la capacidad ante cargas laterales del 3DR ($R1 = 0.94\%$) la excedía en 1.12 veces. En la Fig. 2a se presenta la envolvente de la respuesta para los modelos 3D y 3DR. De acuerdo a la evidencia experimental, se ha observado que la expresión propuesta por la normatividad vigente para estimar la capacidad ante cargas laterales de muros de mampostería confinada considerando un factor de reducción de resistencia unitario coincide, aproximadamente, con la carga de agrietamiento, V_{agr} , medida en los especímenes ensayados (Sánchez, 1998).

Degradación de rigidez. La técnica de rehabilitación empleada permitió recuperar 2/3 de la rigidez inicial y 6.7 veces la rigidez remanente del modelo original. En este estudio se consideró como rigidez remanente a la obtenida para el último ciclo de carga del 3D, la cual correspondió aproximadamente al 10% de la rigidez inicial. En la Fig. 2b se presenta la degradación de rigidez para ambos modelos. A pesar de que la tasa de deterioro de la rigidez lateral decreció con una tendencia exponencial en ambos especímenes, la cantidad y el tipo de refuerzo retrasaron la formación de un *piso suave* en el modelo rehabilitado, inclusive hasta un nivel de distorsión de entrespiso

considerado como excesivo para estructuras de mampostería confinada ($RI = 0.35\%$). En la Fig. 3a se presenta la relación de rigideces para el primer y segundo nivel de ambos modelos.

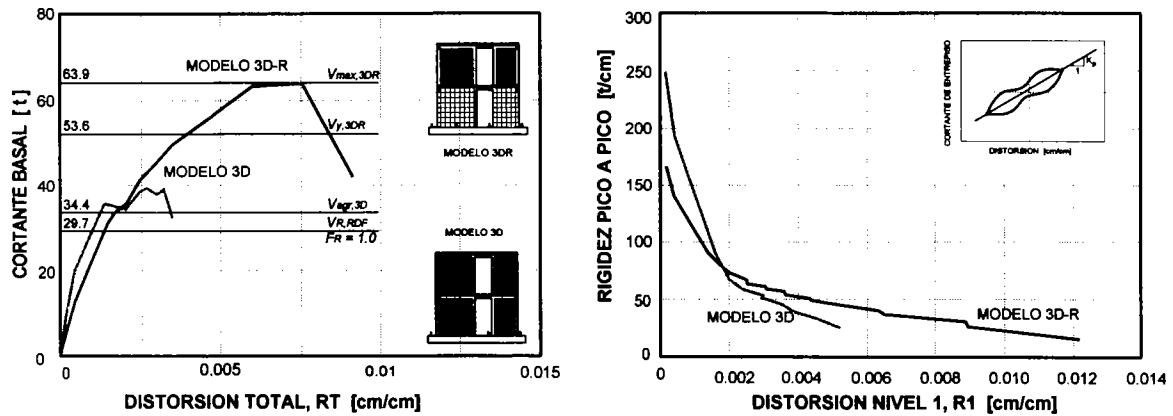


FIGURA 2. (a) Envolvente de la respuesta de los modelos 3D y 3DR; (b) Degradación de rigidez de los modelos 3D y 3DR

Capacidad de desplazamiento y disipación de energía. La participación de los alambres horizontales permitió al modelo 3DR incrementar la capacidad de desplazamiento (i.e., el 3DR alcanzó su resistencia a una distorsión del primer nivel, R , de 0.94%, mientras que en el 3D ocurrió a una distorsión de 0.36%). En el primer nivel, el espécimen rehabilitado disipó la misma cantidad de energía acumulada final del espécimen original (para $RI = 0.5\%$) hasta una distorsión de entrepiso de 0.67%, alcanzando a disipar dos veces la cantidad de energía de la estructura original (ver Fig. 3b).

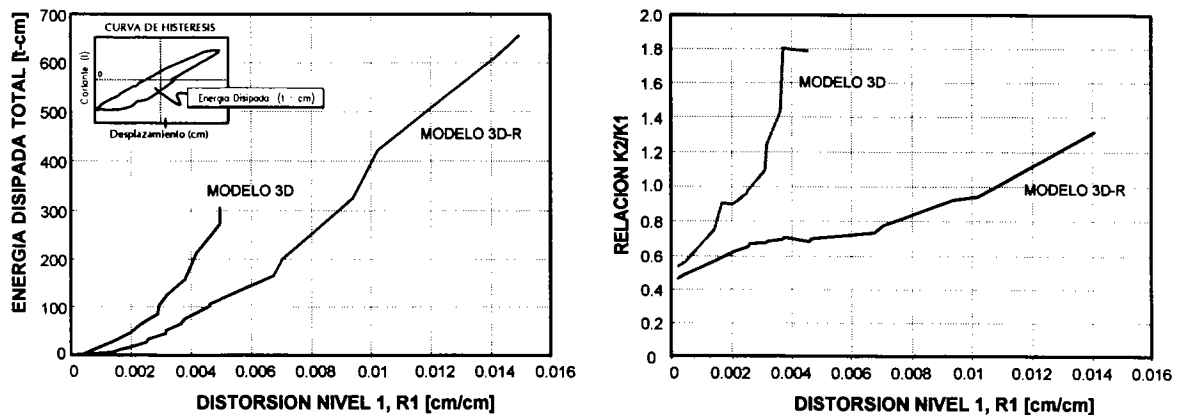


FIGURA 3. (a) Relación de rigideces de N1 y N2 de los modelos 3D y 3DR; (b) Disipación de energía de los modelos 3D y 3DR

Eficiencia del refuerzo horizontal y el tipo de anclaje. A partir del análisis de los deformímetros colocados en la malla de alambre se estimó la eficiencia (η) de los alambres horizontales y verticales. El factor de eficiencia horizontal, η_h , se estimó como el promedio del cociente entre la fuerza medida en los alambres horizontales que cruzan la grieta diagonal y la fuerza cortante de fluencia del refuerzo horizontal. Este factor refleja la no uniformidad de la distribución de deformaciones del refuerzo en la altura del muro. La eficiencia de los alambres horizontales, en su participación a la resistencia, varió con el nivel de distorsión, la densidad de anclajes y la relación de aspecto de los paneles. En los paneles con relación de aspecto igual a 1 se midió una mayor eficiencia (hasta

72%) que en los paneles relación de aspecto igual a 1.5 (hasta 67%), ambos situados en el lado con mayor densidad de anclajes, para el nivel de distorsión correspondiente a la resistencia del 3DR ($R_I = 0.94\%$). El refuerzo alcanzó su máxima eficiencia promedio en todos los paneles (64%) para una distorsión del primer nivel entre 0.67% y 0.75%. El deterioro de resistencia del modelo coincidió con una disminución en la eficiencia del refuerzo horizontal, asociado a la falla de los anclajes utilizados y a la fractura o desprendimiento de algunos alambres horizontales. En general, el uso de corcholata y clavo a manera de anclaje resultó adecuado. Sin embargo, su eficiencia disminuyó al iniciarse el desconchamiento del recubrimiento de mortero a una distorsión de entrepiso de 0.46%, aproximadamente, atribuido a la poca adherencia entre el clavo y la mampostería. Así, se sugiere dar preferencia a los muros cuadrados (H/L menor o igual a 1) respecto a los rectangulares durante un proceso de rehabilitación.

CONSIDERACIONES PARA LA REHABILITACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

Como se evidenció en la sección anterior, el uso de malla de alambre y recubrimiento de mortero como técnica de rehabilitación para estructuras de mampostería confinada ha presentado un excelente comportamiento estructural. Basado en la evidencia experimental más reciente, en esta sección se presentan algunas recomendaciones cualitativas y cuantitativas para la evaluación, diseño y construcción de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas con el método antes descrito, en un intento por aportar criterios objetivos y sencillos en el área de rehabilitación de estructuras.

Evaluación

Cualquier estructura dañada por un sismo, o bien aquella estructura existente que requiere cumplir con requisitos normativos más severos, debe seguir un proceso de rehabilitación estructural. Normalmente, dicho proceso debe incluir tres etapas básicas: a) inspección visual y levantamiento de daños, en caso de haber ocurrido un evento sísmico; 2) clasificación y evaluación preliminar de daños y; 3) Elección del método de reparación y/o refuerzo adecuado. Para cumplir con la segunda etapa, en la mayoría de los casos se utilizan metodologías basadas en la estimación de la capacidad ante cargas laterales. Sin embargo, existen dos aspectos que han recibido poca atención: la estimación de las propiedades mecánicas de la mampostería *in situ* (como el módulo de elasticidad y el módulo de cortante) y la degradación de rigidez para estructuras de mampostería confinada. La evidencia experimental en muros aislados y en sistemas acoplados tridimensionales a escala natural de mampostería confinada sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles ha mostrado que la rigidez inicial disminuye a una tasa de deterioro de forma exponencial en función del nivel de desplazamiento lateral (Sánchez, 1998). En la Fig. 3a se muestra la degradación de rigidez en función de la distorsión obtenida para diversos especímenes de mampostería confinada.

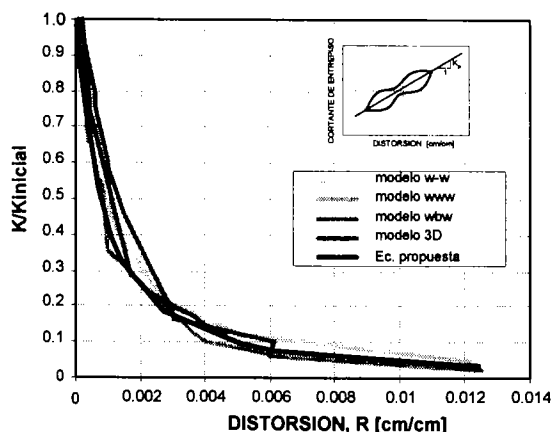


FIGURA 4. Degradación de rigidez en muros de mampostería confinada (Sánchez, 1998)

Como puede observarse, el valor inicial de la rigidez se ha deteriorado aproximadamente en 65% para un nivel de distorsión correspondiente al inicio del fisuramiento inclinado en la superficie de los paneles de mampostería ($R = 0.13\%$ en promedio). Con el fin de proporcionar información para desarrollar un método simplificado para fines de evaluación, en la Tabla 3 se relaciona el desempeño observado (estado de daño) en especímenes de mampostería confinada sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles del tipo sísmico (i.e., las que ocurren durante un evento sísmico) con el nivel de distorsión, el nivel de deterioro de sus propiedades estructurales (resistencia y rigidez) y su clasificación aproximada de acuerdo a una tabla de evaluación propuesta en la literatura (Rodríguez y Castrillón, 1995).

TABLA 3. Grado de daño y deterioro de las propiedades estructurales en muros de mampostería confinada ensayados ante cargas laterales cíclicas reversibles del tipo sísmico

Estado de Daño Observado	Distorsión (%)	$R / R_{inicial}$	V / V_{max}	Grado de Daño
Fisuras horizontales, por flexión. Fisuras verticales, por flexión, cercanas al paño de los castillos.	0.04	0.80	0.50	Ligero (I)
Primer agrietamiento de la mampostería, por tensión diagonal o cortante.	0.13	0.35	0.85	Moderado (II y III)
Inicio de la penetración del fisuramiento inclinado en los extremos de los castillos.	0.20	0.27	0.90	Fuerte (IV)
Agrietamiento en forma de "X" en todos los paneles de mampostería.	0.23	0.24	0.98	Fuerte (IV)
Aplastamiento del concreto, agrietamiento horizontal distribuido en la altura de los castillos.	0.32	0.18	1.0	Fuerte (V)
Concentración de grietas diagonales en los extremos de los castillos. Desconchamiento del recubrimiento de concreto.	0.42	0.13	0.99	Grave (V)
Concentración de daño en los extremos inferiores de los castillos. Plegamiento del refuerzo longitudinal (deformación en "S").	0.50	0.10	0.80	Grave (no se clasifica)

() Clasificación de acuerdo a la Tabla 5 de la Ref. (Rodríguez y Castrillón, 1995)

Adicionalmente a la anchura de las grietas en la superficie de los paneles de mampostería, y dada la importancia de los castillos (Alcocer, 1997), se sugiere incluir en el grado de daño de las tablas de evaluación para muros de mampostería confinada la siguiente descripción referente a la condición de los castillos: a) Ligero. *Sin daño aparente, ligeras fisuras horizontales en los extremos de los castillos*; b) Fuerte. *Con daño incipiente, indicios de la incursión de las grietas inclinadas en los extremos de los castillos*; c) Grave. *Con daño severo, grietas inclinadas que incursionan en los extremos de los castillos*

Como puede observarse en la Tabla 3, la degradación de rigidez es un parámetro muy importante que debe tenerse en cuenta, tanto en la evaluación de estructuras existentes como en el diseño de nuevas estructuras de mampostería confinada, y que es mayor en la medida en que aumenta el nivel de distorsión lateral. En una evaluación analítica del comportamiento de edificaciones de mampostería confinada en el estado de Michoacán durante el sismo del 11 de

enero de 1997 ($M_s = 7.3$), se evidenció que el daño exhibido pudo estar asociado a una distorsión lateral, o demanda de deformación lateral, del orden de 0.15% (Rodríguez *et al*, 1997). En base a los resultados experimentales obtenidos de muros aislados y sistemas acoplados de mampostería confinada, una buena aproximación del índice de degradación de rigidez lateral (i.e., el cociente de la rigidez lateral K y la rigidez lateral elástica K_e) en función del nivel de distorsión estaría dada por la siguiente relación

$$\frac{K}{K_e} = \frac{1}{1 + \alpha R^\beta} \quad (1)$$

donde α y β son parámetros que definen la degradación de rigidez y R es la distorsión lateral definida como el desplazamiento relativo entre la altura de entrepiso. A partir de un análisis de regresión, los valores de $\alpha = 5300$ y $\beta = 1.2$ proporcionan una buena estimación de la degradación de rigidez (ver Fig. 4). Diversas recomendaciones para la estimación de K_e para muros de mampostería confinada pueden encontrarse en la literatura. A fin de evitar un rápido deterioro de la rigidez lateral asociado a un grado de daño grave en los muros de mampostería y la posibilidad de formar un *piso suave* en la estructura se sugiere limitar la distorsión de entrepiso (i.e., cociente del desplazamiento lateral y la altura del entrepiso) a un valor máximo de 0.30%.

Resistencia de Diseño por Cortante

De acuerdo a la evidencia experimental (Ruiz, 1995) y para fines de diseño, una buena aproximación a la resistencia ante cargas laterales de una estructura rehabilitada con malla de alambre y recubrimiento de mortero, V_u , estaría dada por la relación

$$V_u = V_{rm} + V_{sm} \quad (2)$$

donde V_{sm} es la contribución de la malla de alambre y V_{rm} es la resistencia remanente. En la participación de la malla de alambre, sólo se consideran los alambres horizontales, mientras que en el valor de V_{rm} se considera incluida la participación de la mampostería y de los elementos confinantes. Se sugiere considerar la capacidad remanente, V_{rm} , de una estructura de mampostería confinada igual a la resistencia a cortante señalada en la normatividad vigente (DDF, 1993) como límite superior de esta contribución. Dada la gran dispersión de las propiedades mecánicas de las piezas de mampostería provenientes de diferentes regiones del país, se sugiere realizar ensayos para medir la resistencia a cortante de la mampostería en vez de utilizar la resistencia de diseño, v^* , recomendada por las normas vigentes en el Distrito Federal (DDF, 1993). Por ejemplo, en el estado de Michoacán se ha medido un esfuerzo cortante promedio igual a 3.0 kg/cm², el cual representa un límite inferior de los resultados obtenidos experimentalmente en muretes construidos con piezas producidas en la región (Alarcón y Alcocer, 1996). Para el Distrito Federal se puede admitir una resistencia a cortante de diseño de la mampostería igual a 3.5 kg/cm² para piezas macizas de barro recocido y considerar un factor de reducción unitario. Para tener en cuenta las incertidumbres inherentes al proceso constructivo, la participación de los mecanismos resistentes, etc., se recomienda emplear un factor de reducción de resistencia F_r igual a 0.8 en la estimación de V_{rm} de acuerdo a la siguiente relación

$$F_r V_{rm} = V_{R,RDF} \quad (3)$$

En la participación de la malla de alambre, sólo se consideran los alambres horizontales, mientras que en el valor de V_{rm} se considera incluida la participación de la mampostería y de los elementos confinantes. La participación de los alambres horizontales a la resistencia se puede calcular con la siguiente expresión

$$V_{sm} = p_h f_y A_T \eta_h \quad (4)$$

donde p_h es la cuantía del refuerzo horizontal, f_y es la resistencia nominal de fluencia de los alambres de la malla, A_T es el área bruta de la sección transversal de muro y η_h es el factor de eficiencia de los alambres horizontales. Se recomienda utilizar un valor de η_h igual a 0.5.

Construcción

Ante el agrietamiento de los muros de mampostería dañados durante un evento sísmico es necesario retirar los fragmentos y piezas sueltas de las grietas, principalmente en las zonas más dañadas. Se sugiere remover el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante chorro de agua. Para fomentar la adherencia entre la mampostería y el recubrimiento de mortero, la superficie de los muros debe estar libre de cualquier acabado (mortero, tirol, yeso, pintura, etc.). Asimismo, la superficie de la mampostería debe estar limpia y con rugosidades (del orden de 0.5 mm de profundidad) mediante un martelinado suave. Se recomienda restaurar las grietas inclinadas en la superficie de la mampostería mediante el relleno con mortero de cemento y en zonas muy dañadas es recomendable sustituir las piezas agrietadas por nuevas piezas. Cuando la anchura de las grietas es inferior a 0.5 mm es conveniente utilizar una lechada de cemento (mezcla fluida de cemento y agua). No se considera necesario el uso de resinas para el relleno de las grietas. La evidencia experimental mostró que la aplicación del recubrimiento de mortero puede realizarse en forma manual o por vía neumática, aumentando en ambos casos la capacidad ante cargas laterales (Delfin *et al*, 1991). En caso de encontrarse dañados los castillos (por ejemplo, con desconchamiento del recubrimiento y parte del núcleo de concreto, plegamiento de las varillas longitudinales, etc.) se recomienda reparar localmente la zona afectada mediante la sustitución del concreto fracturado con concreto nuevo, y enderezar los plegamientos de las varillas. La evidencia experimental ha mostrado que la contribución del mecanismo de dovola del refuerzo longitudinal (por ejemplo, plegamiento del refuerzo longitudinal cuando las grietas inclinadas incursionan en los castillos) ha sido benéfico para sostener la capacidad de deformación y aumentar la capacidad ante cargas laterales por encima de la carga de agrietamiento, por lo que se sugiere reforzar los extremos de los castillos con estribos cerrados a cada hilada o a $d_c/2$ (la que resulte en una menor separación) en una longitud no menor que un sexto de su altura libre, $4d_c$, ni que 40 cm, donde d_c es el peralte del castillo (Alcocer, 1997). Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y de obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se recomienda utilizar una densidad mínima de 9 anclajes/m². El uso de corcholata y clavos para madera de 5 cm de longitud a manera de anclaje mostró buenos resultados si se utiliza con una densidad mínima de 9 anclajes/m². También es posible el uso de arandelas metálicas a manera de anclaje. Se sugiere que los bordes de la malla se sujeten a los castillos y dadas mediante anclajes adicionales, así como buscar que la malla de alambre rodee los castillos. Diversas recomendaciones cualitativas (i.e., colocación en puertas, ventanas, disposición de los anclajes) para el mejor uso de esta técnica, basadas en experiencias de estructuras dañadas en la región balcánica, pueden encontrarse en (Iglesias *et al*, 1987).

CONCLUSIONES

A partir de una revisión de la evidencia experimental más reciente obtenida en diversos programas de investigación, en este trabajo se presentan recomendaciones para la rehabilitación de estructuras a base de muros de mampostería confinada que han sufrido daño del tipo sísmico:

1. El uso de malla de alambre recubierta con mortero de cemento como técnica de rehabilitación permite incrementar la capacidad ante cargas laterales, disminuir la tasa de deterioro de la rigidez lateral y aumentar la capacidad de desplazamiento en estructuras de mampostería con daño severo.
2. La resistencia ante cargas laterales que aporta la malla de alambre electrosoldada depende de la cuantía y la eficiencia de los alambres horizontales, la calidad y la densidad de los anclajes para ligar la malla al muro, la relación de aspecto de los paneles, así como la calidad del recubrimiento.
3. En la estimación de la capacidad ante cargas laterales es posible tener en cuenta la *resistencia remanente* de la mampostería si se lleva cabo un proceso de reparación local de las grietas inclinadas y castillos, así como el tratamiento de la superficie de los muros de mampostería.
4. Es conveniente tener en cuenta el deterioro de rigidez lateral como criterio adicional a la capacidad ante cargas laterales, como tradicionalmente se ha empleado, para la evaluación de las estructuras de mampostería confinada que han sufrido daño del tipo sísmico. El uso de funciones que permitan correlacionar la degradación de rigidez y, por consiguiente, el daño físico en función de la distorsión lateral puede complementar los pasos a seguir durante un proceso de evaluación estructural. Para ello, es necesario contar con mayor evidencia experimental y levantamiento de daños después de un sismo para calibrar la metodología propuesta, tomar en cuenta la diversidad en las propiedades mecánicas de los materiales y el tipo de construcción (i.e., confinada o reforzada).

5. Con el fin de limitar el nivel de daño ante la incidencia de un evento sísmico, se sugiere que las estructuras de mampostería confinada sean diseñadas para no exceder una distorsión entrepiso del orden de 0.25 a 0.30 %.

AGRADECIMIENTOS

El programa experimental de los modelos 3D y 3DR se llevo a cabo en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres, como parte de un extenso programa de investigación sobre el comportamiento de estructuras de mampostería. El estudio contó con el patrocinio del Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT) y de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). El apoyo brindado por el Dr. Roberto Meli Piralla es grandemente apreciado.

REFERENCIAS

Alarcón, P. y Alcocer, S. M. (1997), “Repercusión de las Características Mecánicas de la Mampostería en el Diseño Sísmico”, *Memorias XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Vol. I, Veracruz, México, pp. 625-634.

Alcocer, S.M. (1997) “Comportamiento Sísmico de Estructuras de Mampostería: Una Revisión”, *Memorias XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Vol. I, Veracruz, México, pp. 164-191.

Delfín, F., Astroza, M., Águila, V., Sepúlveda, L. (1991), “Evaluación de la Eficiencia de Soluciones de Reparación para Muros con Daños del Tipo Sísmico en Muros de Albañilería Confinada”, *Memorias Primer Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y III de Control de Calidad*, Córdoba, Argentina.

Departamento del Distrito Federal (1993), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 21 pp.

Hernández, O. (1981), “Procedimientos de Reparación de Estructuras Dañadas por Sismo, Primera Etapa”, *Proyecto de Investigación No. 0731*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Iglesias, J., Robles-Fernández, F., De la Cera, J., González, O. (1987), “Manual de Reparación de Estructuras de Concreto y Mampostería”, Depto. de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México, D.F.

Ruiz García, J. (1995), “Reparación y Refuerzo de una Estructura Tridimensional de Dos Niveles a Escala Natural”, *Tesis de maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 251 pp.

Rodríguez, M. y Castrillón, E. (1995) “Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estructural de Edificaciones”, *Serie del Instituto de Ingeniería No. 569*, Universidad Nacional Autónoma de México, 57 pp.

Rodríguez, M., Alarcón, P. y Machicao, R. (1997), “Evaluación del Comportamiento Sísmico de Estructuras a Base de Muros de Mampostería Durante el Sismo de Caleta de Campos, del 11 de Enero de 1997”, *Memorias XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Vol. II, Veracruz, México, pp. 1361-1370.

Sánchez, T. A. (1998), “Comportamiento de Estructuras de Mampostería Confinada Sujetas a Cargas Laterales”, *Tesis de maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 212 pp.