



## REHABILITACION SISMICA DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERIA PARA VIVIENDA

Jorge Ruiz García<sup>1</sup>

### RESUMEN

La acción de eventos naturales, como el viento o los sismos, puede inducir daño estructural en las edificaciones. Por ello, es necesario conocer técnicas que permitan recuperar y mejorar las características estructurales de edificaciones dañadas ante la eventualidad de acciones futuras. Así, el objetivo general de este trabajo consiste en presentar una revisión de las técnicas de rehabilitación aplicables a edificaciones de mampostería para vivienda que han sufrido daño estructural, principalmente cuando han sido sometidas a la acción sísmica. En particular, se describen los criterios de diseño y construcción cuando se decide emplear malla de alambre electrosoldada como esquema de rehabilitación sísmica para muros de mampostería, o bien para edificaciones de mampostería que requieren incrementar su capacidad ante cargas laterales debido a requisitos normativos más severos. Para tal fin, se ilustra el proceso de rehabilitación estructural de una casa habitación de dos niveles que sufrió daño del tipo sísmico.

### ABSTRACT

Natural hazards such as wind storms and earthquakes might induce structural damage in man-made structures. Then, it is important to know retrofit techniques that would allow upgrading the original structural behavior under future events. Thus, the goal of this paper is to present an overview of techniques aimed at retrofitting confined masonry low-cost housing dwellings or medium-rise apartment buildings damaged due to seismic attack. In particular, this paper provides some suggestions to evaluate, to design, and to carry out the construction process using welded wire mesh as a retrofit technique of damaged confined masonry walls. For illustration purposes, an example of the retrofit process in a typical confined masonry housing dwelling is presented.

### INTRODUCCION

Inspecciones de campo posteriores a eventos sísmicos históricos han evidenciado la vulnerabilidad de edificaciones de mampostería, principalmente en aquellas ubicadas cerca de la fuente sísmica (Ruiz et al., 2003; Rodríguez, 2004). Por ejemplo, 25,353 viviendas de una muestra de 140,572 fueron afectadas a consecuencia del sismo ocurrido el 21 de enero del 2003 ( $M_w=7.4$ ), denominado el sismo de Tecomán, causando, aproximadamente, 27 millones de dólares en pérdidas económicas directas e indirectas (EERI, 2006). Del censo de viviendas que sufrieron daño estructural, 31.4% experimentaron daño ligero y requirieron reparaciones menores, 53.7% exhibieron daño moderado y necesitaron reparaciones mayores, mientras que el 14.9% de las viviendas colapsaron (EERI, 2006).

Ante este panorama, es necesario conocer técnicas adecuadas que permitan *rehabilitar*, en la mayoría de los casos, edificaciones de uso habitacional que han sufrido daño ante la eventualidad de acciones naturales, como los sismos o huracanes, o bien que requieren incrementar su nivel de seguridad estructural a raíz de requerimientos normativos más severos. Para fines de este trabajo, se define como *rehabilitación* al proceso

---

<sup>1</sup> Profesor-Investigador Titular, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. C Planta Baja, Cd. Universitaria, 58040 Morelia, Mich. Teléfono: (443)322-3500x1139; [jruizgar@stanfordalumni.org](mailto:jruizgar@stanfordalumni.org)

de recuperación (reparación) y mejoramiento de las características originales (refuerzo) de una estructura o elementos constitutivos para devolver o incrementar su funcionalidad y seguridad estructural ante eventos naturales futuros. De esta manera, el proceso de rehabilitación estructural puede dividirse en tres etapas básicas: 1) Inspección visual acompañada de un levantamiento cuidadoso de los daños, para estimar las causas y el grado de deterioro del inmueble, 2) clasificación y evaluación de los daños, con la intención de definir si la estructura se debe demoler o se puede rehabilitar, y 3) en caso de ser factible la rehabilitación desde un punto de vista socio-económico, elegir las técnicas de reparación y/o refuerzo que permitan una rehabilitación adecuada.

El objetivo general de este trabajo consiste en presentar una revisión de los criterios para la rehabilitación de estructuras de mampostería, principalmente cuando han sido sometidas a la acción sísmica. En particular, se describe el uso de la malla de alambre electrosoldada como esquema de rehabilitación para edificaciones de mampostería que han sufrido daño del tipo sísmico, o bien en aquellas que requieren incrementar su capacidad ante cargas laterales para disminuir su vulnerabilidad sísmica. En principio, se presenta una exposición del comportamiento observado en edificaciones de mampostería durante eventos sísmicos y se describen las consideraciones para su inspección, evaluación y clasificación del daño. Posteriormente, se describen las técnicas propuestas tanto en México así como en otros países latinoamericanos para la reparación y/o refuerzo de muros de mampostería, mencionando la evidencia experimental que les ha dado sustento. En particular, dado su amplio uso en la práctica mexicana y su buen desempeño experimental, se comentan las consideraciones de diseño y construcción para el empleo de malla de alambre recubierta con mortero de cemento como esquema de rehabilitación estructural. Finalmente, se presentan un ejemplo que ilustran el proceso de rehabilitación sísmica mediante esta técnica.

### **COMPORTAMIENTO OBSERVADO, MODOS DE FALLA Y CAUSAS DEL DAÑO EN EDIFICACIONES PARA VIVIENDA**

A continuación se presenta una breve revisión del comportamiento observado en edificaciones de mampostería para uso habitacional después de la ocurrencia de eventos sísmicos históricos en México, resaltando los modos de falla más comunes y las posibles causas que les dieron origen. Con la finalidad de dar claridad a la descripción, se distinguen los siguientes tipos de mampostería empleados comúnmente para la construcción de vivienda unifamiliar y multifamiliar: 1) Confinada, y 2) confinada con refuerzo interior.

#### **COMPORTAMIENTO OBSERVADO**

Respecto a las edificaciones a base de muros de mampostería confinada con dalas y castillos, construidos con piezas artesanales o industrializadas, se han observado patrones de agrietamiento característicos los cuales se mencionan a continuación.

- En general, se ha observado agrietamiento inclinado en muros de mampostería a lo largo de la diagonal del panel (ver figura 1), el cual es más notable cuando los muros de mampostería no se encuentran confinados con dalas y castillos, o bien no existía una adecuada conexión entre el muro y los elementos de confinamiento (ver figura 2).



**Figura 1** Agrietamiento inclinado en muros de mampostería confinada (Alcocer et al., 2003)



**Figura 2** Falta de confinamiento e inadecuada conexión de mampostería con elementos confinantes (Alcocer et al., 2003)

- Agrietamiento diagonal que inicia en las aberturas de los muros (puertas y ventanas), debido a una falta de confinamiento (ver figuras 3 y 4).



**Figura 3** Falta de confinamiento en aberturas (Alcocer et al., 2003)



**Figura 4** Daño que parte de las esquinas de las aberturas (Alcocer et al., 2003)

- En numerosas ocasiones, se ha observado agrietamiento concentrado en la planta baja, principalmente en edificaciones para vivienda multifamiliar, lo cual conduce a un tipo de falla conocido como de *piso suave* (ver figura 5). Este tipo de daño se origina por una distribución irregular en elevación de densidad de muros; es decir, la planta baja contaba con una densidad menor de muros que en los pisos superiores. En general, se ha observado que el daño en edificaciones de mampostería se incrementa cuando la densidad de muros es relativamente baja en la dirección donde actúa la acción sísmica.



**Figura 5** Agrietamiento concentrado en la planta baja (Alcocer et al., 2003; Jara et al., 2005)

## CAUSAS DE LOS TIPOS DE DAÑO Y MODOS DE FALLA

A continuación, se resumen las causas principales que dan origen a los daños observados y modos de falla más comunes debido a la acción sísmica en edificaciones de mampostería para vivienda.

### Edificaciones de mampostería confinada sin refuerzo interior

Usualmente, en muros de mampostería confinada sin refuerzo interior se presentan los siguientes patrones de agrietamiento:

- Agrietamiento inclinado ocasionado por esfuerzos de tensión diagonal (figura 6a), o bien en forma escalonada que sigue la junta de mortero debido a esfuerzos de corte (figura 6b). El primer patrón de



agrietamiento ocurre cuando la calidad del mortero es superior que la calidad de la pieza, mientras que el segundo patrón se presenta cuando la calidad del mortero es inferior a la de la pieza. El agrietamiento inclinado, ya sea por tensión diagonal o cortante, puede extenderse a los extremos de los castillos.

- Agrietamiento vertical en las esquinas y el centro ocasionado por la flexión fuera del plano del muro, así como el volteo de la estructura.



**Figura 6 a) Falla por tensión diagonal; b) Falla por esfuerzos de corte (Alcocer et al., 1999)**

Entre las causas que originan el daño generalizado en edificaciones de mampostería se encuentran:

- La ausencia de una adecuada configuración estructural.
- Cantidad insuficiente de muros en ambas direcciones.
- Mala calidad de los materiales.
- Poca atención en la conexión de los elementos de confinamiento.

### **Edificaciones de mampostería con refuerzo interior**

En este tipo de edificaciones, el daño observado se ha atribuido a las siguientes causas:

- Fallas locales de las piezas (desprendimiento de paredes), debido a un espesor reducido, o bien a que la cantidad de huecos es muy grande.
- Inadecuado anclaje del refuerzo del interior con los elementos de confinamiento.
- Insuficiente cantidad de refuerzo interior.
- Deficiente colado de los castillos interiores (ver figura 7), o bien los huecos donde se coloca el refuerzo interior.



**Figura 7 Inadecuado colado de castillo interno en un muro construido con piezas extruídas (Alcocer et al., 1999).**

### **INSPECCION, EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE DAÑO**

Como se menciona anteriormente, el proceso de rehabilitación estructural comienza con una inspección de campo para recabar información que permita evaluar y clasificar el tipo de daño observado. Dada la importancia de esta etapa, los trabajos deben ser llevados a cabo por personal calificado con la misión de recabar la siguiente información:

- Identificar si se trata de muros de mampostería sin refuerzo, confinada o con refuerzo interior, así como el tipo de cimentación empleado.
- Obtener información de la cantidad y distribución de los muros en ambas direcciones, así como de la cantidad y disposición de las aberturas (puertas y ventanas).
- Identificar si existen asentamientos cerca de la construcción, o bien desplomos iniciales en los muros.
- Identificar si existe deterioro de las piezas por la humedad o el intemperismo.
- Registrar el espesor e inclinación de las grietas en la superficie de la mampostería y en las dadas o castillos, la extensión de las grietas inclinadas hasta los castillos, la cantidad de refuerzo longitudinal y la separación de los estribos (revisar si es posible si existió plegamiento de las varillas), aplastamiento del concreto en el recubrimiento o parte del núcleo.
- La cantidad y el porcentaje respecto al total de los elementos estructurales y no-estructurales afectados.

Posteriormente, con la información recabada se puede obtener una clasificación preliminar del estado de daño y una evaluación preliminar de la estructura de mampostería mediante tablas 1 y 2 propuestas en la literatura (Iglesias et al., 1988; Rodríguez y Castrillón, 1995).



**Tabla 1 Clasificación y evaluación del tipo de daño (Iglesias et al., 1988)**

Clasificación	Tipo de daño	Evaluación
No estructural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daños únicamente en elementos no estructurales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe reducción en la capacidad sismo-resistente.</li> <li>• No se requiere desocupar.</li> <li>• La reparación consistirá en la restauración de los elementos no estructurales.</li> </ul>
Estructural ligero	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas de menos de 0.5 mm de ancho en elementos de concreto.</li> <li>• Fisuras y caídas de aplanados en paredes y techo.</li> <li>• Grietas de menos de 0.3 mm de ancho en muros de mampostería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe reducción en la capacidad sismo-resistente.</li> <li>• No se requiere desocupar.</li> <li>• La reparación consistirá en la restauración de los elementos dañados.</li> </ul>
Estructural fuerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas de menos de 0.5 a 1 mm de ancho en elementos de concreto.</li> <li>• Grietas de menos de 3 a 10 mm de ancho en muros de mampostería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe una reducción importante en la capacidad sismo-resistente.</li> <li>• Debe desocuparse y mantenerse sólo acceso controlado, previa rehabilitación temporal.</li> <li>• Es necesario realizar un proyecto de reparación para la restauración y el refuerzo de la estructura.</li> </ul>
Estructural Grave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas de más de 1 mm de ancho en elementos de concreto.</li> <li>• Desprendimiento del concreto, rotura de estribos y pandeo del refuerzo en columnas y muros de concreto.</li> <li>• Agrietamiento de las losas planas alrededor de las columnas.</li> <li>• Aberturas en muros de mampostería.</li> <li>• Desplomos en columnas de más de 1:100 de su altura.</li> <li>• Desplomos del edificio de más de 1:100 de su altura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existe una reducción importante en la capacidad sismo-resistente.</li> <li>• Debe desocuparse y suprimirse el acceso y la circulación en la vecindad.</li> <li>• Es necesario proteger las calles y los edificios vecinos mediante rehabilitación temporal, o proceder a la demolición urgente.</li> <li>• De ser posible deberá recurrirse a una evaluación definitiva que permita decidirse procede la demolición o bien el refuerzo generalizado de la estructura.</li> </ul>

**Tabla 2 Clasificación y evaluación del grado de daño (Rodríguez y Castrillon, 1995).**

Grado	Estado de daño en muros de mampostería	Ancho de grieta [mm]
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas pequeñas difícilmente visibles sobre la superficie del muro.</li> <li>• Grietas mínimas en castillos y dalas de confinamiento.</li> </ul>	< 0.2
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grietas claramente visibles sobre la superficie del muro.</li> </ul>	0.2 – 1.0
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inicio de la formación del agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas.</li> <li>• Grietas considerablemente grandes en la superficie del muro.</li> <li>• Agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas, o en muros de relleno de concreto reforzado.</li> </ul>	1.0 – 3.0
IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas.</li> <li>• Desprendimiento de parte de piezas.</li> <li>• Aplastamiento local de la mampostería.</li> <li>• Prolongación del agrietamiento diagonal en castillos y dalas</li> </ul>	> 3.0
V	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas</li> <li>• Deformación, inclinación horizontal o vertical apreciable del muro.</li> </ul>	> 1.0

Con el fin de proporcionar información adicional para fines de evaluación, Ruiz y Alcocer (1998) propusieron la tabla 3 para relacionar el estado de daño observado en especímenes de mampostería confinada sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles del tipo sísmico, con el nivel de distorsión, el nivel de deterioro de sus propiedades estructurales (rigidez y resistencia) y su clasificación aproximada.

**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 (Ruiz y Alcocer, 1998)**

Estado de daño observado	Distorsión (%)	R / R <sub>inicial</sub>	V/V <sub>max</sub>	Grado de daño
Fisuras horizontales por flexión, Fisuras verticales por flexión, cercanas al paño de los castillos.	0.04	0.08	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 la 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 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)

## TECNICAS DE REHABILITACION SISMICA PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

En la última etapa del proceso de rehabilitación sísmica debe decidirse cual es el método más adecuado, tomando en cuenta diversas opciones existentes. Cualquiera que se la técnica elegida, el dueño/usuario conjuntamente con el diseñador definirá el desempeño que esperan de la estructura ante las acciones de diseño durante su vida útil. Bajo esta premisa, el diseñador seleccionara los criterios, sistemas estructurales y métodos de rehabilitación más adecuados.

Para fines de rehabilitación sísmica de edificaciones construidas a base de muros de mampostería, se han propuesto y evaluado experimentalmente las siguientes técnicas:

- Relleno de las grietas principales mediante inyección de resinas o morteros epóxicos y morteros de cemento.
- Empleo de refuerzo (grapas) horizontal o diagonal a través del agrietamiento principal del muro.
- Inserción y anclaje de refuerzo en perforaciones hechas a lo largo de la junta de la hilada.
- Colocar malla de alambre sujeta a la superficie de los muros de mampostería recubriéndola con mortero de cemento.
- Empleo de flejes metálicos o de plástico en la superficie de los muros.
- Uso de bandas fabricadas con láminas de fibra de carbón en la superficie de los muros.

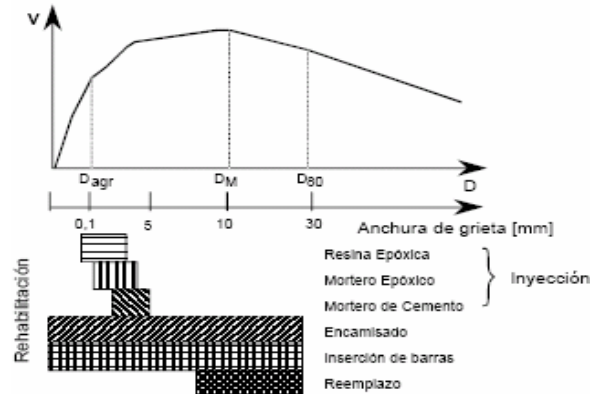
Debe mencionarse que el uso de flejes metálicos o de plástico (Ramírez y Carreón, 2003), así como el uso de bandas fabricadas con fibras de carbón (Alcocer, 2003) como técnica de rehabilitación estructural para





edificaciones de mampostería para vivienda han sido recientemente evaluadas experimentalmente en México y su uso todavía no se encuentra difundido en la práctica profesional.

En la figura 8 se muestra esquemáticamente la curva carga lateral-deformación lateral observada en muros de mampostería, así como una relación entre la anchura de las grietas y las técnicas de rehabilitación que pueden ser empleadas (Alcocer, 2003).



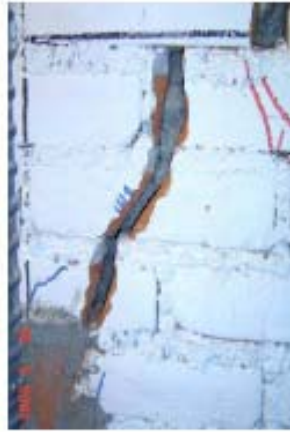
**Figura 8 Desempeño de un muro de mampostería existente, nivel de daño esperado y posibles esquemas de rehabilitación (Alcocer, 2003)**

A continuación se describen brevemente las técnicas de rehabilitación sísmica para edificaciones de mampostería propuestas en México y otros países latinoamericanos. Una descripción detallada sobre su empleo y los programas experimentales que le han dado sustento puede encontrarse en Ruiz (1995), Ruiz y Alcocer (1998), Alcocer (2003), así como Ramírez y Carreón (2003).

## RELLENO DE LAS GRIETAS

Una de las técnicas de rehabilitación más difundidas y conocidas consiste en rellenar las grietas de los muros dañados con resina epóxica, mortero epóxico o con mortero de cemento. Esta técnica tiene la ventaja de permitir la funcionalidad de la estructura durante su ejecución así como mantener su apariencia estética. La elección del material de relleno depende de la anchura de las grietas (ver figura 9). Sin embargo, cabe notar que el relleno con mezclas epóxicas ha sido utilizado con mayor frecuencia en elementos de concreto que en muros de mampostería, debido al costo que implica su uso.

Cabe notar que cualquiera que sea el material de relleno, la viscosidad es una característica deseable, la cual permitirá una penetración adecuada en la grieta. Adicionalmente, es deseable que los morteros de cemento presenten baja segregación, sangrado controlado, reducida contracción plástica y adecuada adherencia con las piezas de mampostería. Por ello, el diseño y colocación del material de relleno son cruciales para que los muros de mampostería exhiban un buen comportamiento. Una descripción detallada del proceso de colocación se puede consultar en Alcocer (2003).



**Figura 9 Relleno de grietas con mortero de cemento (Flores et al., 2004)**

Resultados experimentales han evidenciado que si el relleno de grietas con mezclas epóxicas se realiza de manera correcta se puede esperar incrementos en resistencia, rigidez y capacidad de deformación lateral del muro, del orden de 70 a 90%, 30 a 80% y del 75 al 90% respectivamente (Hidalgo et al., 1991). Por otra parte, el uso de morteros de cemento con baja densidad, tipo lechada, ha sido empleado con frecuencia en la práctica mexicana. Esta técnica fue evaluada experimentalmente por Hernández (1981), quien ensayó tres muros de mampostería construidos con tabique extruido tipo rejilla sometidos a carga monótona creciente hasta que exhibieron agrietamiento por tensión diagonal, que incluso penetra los castillos, clasificándose su estado de daño final como severo. Posteriormente, los muros se rehabilitaron y se volvieron a ensayar. Para el relleno de las grietas, se emplearon tres tipos de mortero: a) mortero comercial de alta adherencia; b) mortero de cemento con aditivo para aumentar la adherencia; y c) únicamente mortero de cemento. A partir de las pruebas se observó que con la primera opción de relleno se recuperó la resistencia y rigidez originales casi en su totalidad. Con la segunda opción de relleno, solo se recuperó la rigidez original y su capacidad ante cargas laterales sólo fue de la mitad de la de los muros originales, mientras que el muro que se relleno con mortero de cemento común sólo se recuperó el 67% de su capacidad ante cargas laterales.

### **REPARACIÓN DE GRIETAS CON INSERCIÓN DE PEDACERÍA DE TABIQUE (RAJUELEO)**

Este tipo de alternativa es recomendable cuando el ancho de la grieta es mayor a 5 mm. La técnica consiste: a) abrir cajas sobre la grieta (ver figura 10), b) limpiar la superficie de la grieta y humedecerlas; y c) se rellena la caja con piezas o pedacería de tabique, pegándola con mortero tipo I, al cual debe agregarse algún aditivo para controlar los cambios volumétricos por fraguado.



**Figura 10 Relleno de grietas con pedacería de tabique (Flores et al., 2004)**



## INSERCIÓN DE BARRAS DE REFUERZO EN LAS JUNTAS DE MORTERO

Esta técnica fue propuesta en Chile (Águila et al., 1988) y consiste en alojar barras de acero en las juntas del mortero por ambas caras del muro, en el sentido longitudinal de los muros (ver figura 11). Posteriormente, las barras de acero se unen mediante alambres galvanizados colocados en perforaciones (barrenos) a cada 50 cm, aproximadamente. Finalmente, una vez colocadas las barras de acero se inyecta un material de relleno. Para fomentar un trabajo conjunto, las barras de acero deben estar ancladas a los castillos mediante ganchos a 90°.

Esta técnica de rehabilitación fue evaluada experimentalmente en la Universidad de Chile mediante un programa experimental que estudio la eficiencia de esta técnica como solución de refuerzo, en muros sin daño previo, y como reparación, en muros con daño previo (Águila et al., 1988). En cada etapa, la técnica fue evaluada en cuatro muretes cuadrados de 120 cm de lado, construidos con ladrillos cerámicos del tipo rejilla, los cuales se sometieron a compresión diagonal. En los muretes reforzados, las variables estudiadas fueron la cuantía de refuerzo horizontal (al colocar el refuerzo en una o ambas caras) y el empleo de mortero epóxico o de cemento para adherir los alambres a la hilada. En los muretes reparados se colocó el refuerzo por ambas caras, siendo la variable en estudio la mezcla para adherir los alambres (mortero de cemento o epóxico). En ambas etapas, el comportamiento de los muretes reparados/reforzados fue comparado con un murete de control sin refuerzo horizontal.

Los resultados experimentales indicaron la resistencia fue 20% superior en los muretes sin daño reforzados con alambres adheridos con mortero epóxico que en los muretes con mortero de cemento. Esto se atribuyó a una mejor adherencia y mayor resistencia a la tensión de la resina epoxica. Sin embargo, las cuantías de refuerzo horizontal, ya sea por una o ambas caras, no influyeron en el comportamiento. Por otra parte, en los muretes reparados con mortero de cemento solo se alcanzó el 80% de la resistencia original. Sin embargo, en un murete con la grieta principal sellada con mortero epóxico, la resistencia aumentó hasta en 37% respecto a la resistencia original. Empleando mortero de cemento, la rigidez inicial promedio fue de 20% respecto a la rigidez inicial, mientras que usando mortero epóxico fue del 50%.

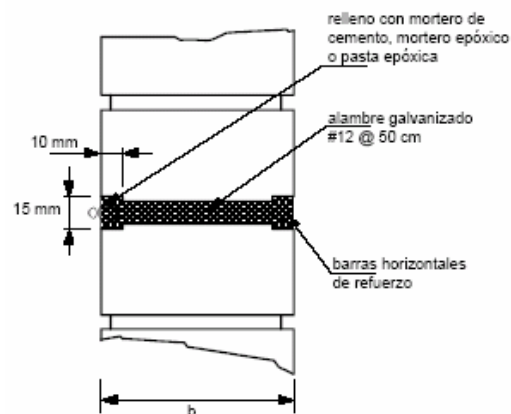
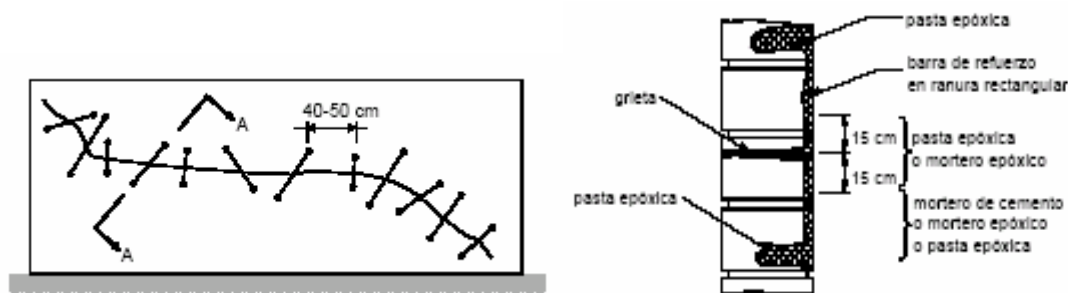


Figura 11 Inserción de barras de refuerzo en las juntas de un muro (Águila et al, 1988; ilustración tomada de Alcocer, 2003)

## EMPLEO DE REFUERZO EN EL AGRIETAMIENTO PRINCIPAL

Cuando el daño se concentra en grietas inclinadas, bien definidas y el número de estas es reducido, en Perú propuso reparar y reforzar los muros de mampostería con barras de acero de refuerzo en forma de grapas (barras con ganchos a 90° en los extremos) (San Bartolomé, 1990). Las grapas se colocan a lo largo de la grieta en barrenos, formando una “costura” en la superficie del muro. Para fijar las grapas a la mampostería se

sugiere rellenar los barrenos con una mezcla epoxica y mortero de cemento. En la figura 12 se ilustra la disposición y el detalle de las grapas.



**Figura 12 Disposición del empleo de refuerzo en el agrietamiento principal (San Bartolomé, 1990, ilustraciones tomadas de Alcocer, 2003)**

Esta técnica de rehabilitación fue evaluada experimentalmente en dos muros de 240 x 240 cm construidos con piezas de tipo artesanal y sometidos a carga cíclica alterna (San Bartolomé, 1990). En uno de los muros se hizo una costura con ocho *grapap*s horizontales del #2, dispuestas cuatro en cada lado del muro. En otro muro, las grapas se colocaron en diagonal, dispuestas alternadamente en direcciones ortogonales en cada cara del muro y perpendiculares a las grietas principales (ver figura 12). Las grapas se sujetaron en perforaciones, o barrenos, hechos de las piezas de mampostería. Como parte del proceso constructivo, se incluyó la reparación local de las grietas diagonales mediante la limpieza y restitución de las piezas sueltas, así como el resanado con mortero de cemento o con concreto simple, de las zonas con mayor daño. Se restituyó el concreto fracturado con otro de mejor calidad en las zonas extremas de los castillos y se dejó un espacio pequeño entre el concreto nuevo y el endurecido para inyectar resina epóxica, con el objeto de mejorar la adherencia y evitar una zona frágil.

Los resultados obtenidos mostraron que la rigidez lateral inicial del muro reparado fue 60% de la rigidez inicial, mientras que la resistencia al primer agrietamiento en los muros reparados fue igual al 50% de la original. Sin embargo, una vez presentado el primer agrietamiento diagonal, la contribución del refuerzo externo permitió incrementar la capacidad máxima ante cargas laterales en más del 20% respecto a la observada en los muros originales. En general, se observó que la colocación de las grapas en forma horizontal resultó más efectiva, debido a que en la dirección diagonal las *grapap*s de refuerzo exhibieron pandeo.

## MALLA DE ALAMBRE Y RECUBRIMIENTO DE MORTERO

Una técnica empleada comúnmente en la práctica mexicana para fines de rehabilitación de muros de mampostería confinada y adobe que han sufrido daño del tipo sísmico consiste en la colocación de malla de alambre, ya sea electrosoldada o tipo *gallinero*, en la superficie de los muros, la cual es recubierta con mortero de cemento (ver figura 13). Esta técnica ha sido evaluada experimentalmente en México y varios países de Latinoamérica con resultados alentadores (Ruiz y Alcocer, 1998). A continuación se describen las conclusiones más importantes derivadas de programas de investigación experimental llevados a cabo en México para evaluar esta técnica de rehabilitación. Una revisión de los programas de investigación experimental llevados a cabo en Chile y Argentina se puede consultar en (Ruiz, 1995, Ruiz y Alcocer, 1998).

Uno de los estudios pioneros para evaluar la efectividad de esta técnica de rehabilitación fue desarrollado por 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 (desplazamiento lateral normalizado respecto a la altura) del orden de 0.4%, 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

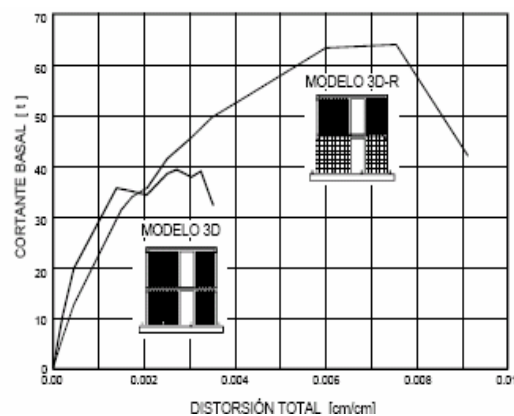


muros reparados se restituyo la rigidez original, mientras que en el tercero no se alcanzo, dado que el aplanado original (de yeso) era de mayor resistencia que el empleado en la reparación (yeso y cemento) para cubrir la malla. En promedio, los muros reparados aumentaron en 64% su capacidad de deformación. Adicionalmente, dos muros construidos con tabique 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.



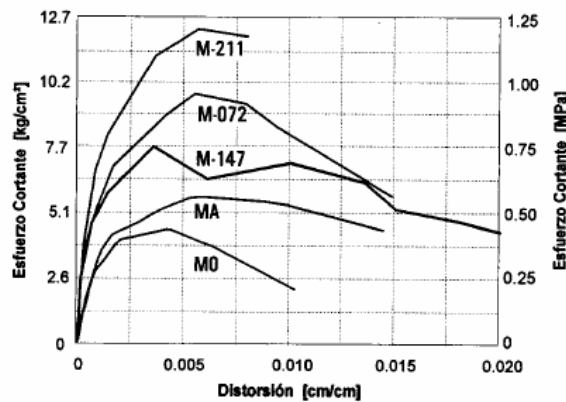
**Figura 13** Uso de malla de alambre electrosoldada para fines de rehabilitación sísmica

Posteriormente, Ruiz (1995) ensayo ante cargas cíclicas alternadas una estructural tridimensional de dos niveles, a escala natural, construida de mampostería confinada con piezas macizas de barro recocido (denominado modelo 3D-R) la cual rehabilitada mediante el uso de malla de alambre electrosoldado 6x6/10-10 y recubrimiento de mortero. La estructura original (denominado modelo 3D) fue ensayada previamente hasta alcanzar una grado de daño considerado como severo. Entre los resultados obtenidos, se observo que el uso de esta técnica permitió recuperar e incrementar hasta en un 64% la capacidad máxima ante cargas laterales y la capacidad de deformación lateral respecto a la capacidad de la estructura sin daño previo (ver figura 14). Asimismo, el uso de esta técnica permitió recuperar hasta en 2/3 la rigidez inicial del espécimen. Así, Ruiz (1995) concluyo que la resistencia ante cargas laterales que aporta la malla de alambre electrosoldada depende de la cuantía y eficiencia de los alambre horizontales, la calidad y densidad de los anclajes para ligar la malla al muro, la relación de aspecto de los muros, así como la calidad del recubrimiento.



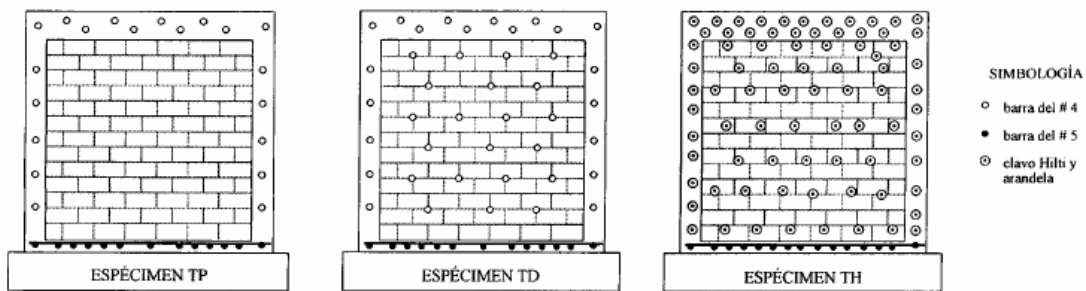
**Figura 14** Envolventes de respuesta del modelo 3D y 3D-R (Ruiz, 1995; Ruiz y Alcocer, 1998)

Con base en el ensaye de cuatro muros de mampostería a escala natural sin daño previo, Alcocer y colaboradores (Alcocer et al., 1996; Zepeda et al., 1996) evaluaron la eficiencia de la malla de alambre como esquema de refuerzo. Entre las variables estudiadas se considero la cuantía del refuerzo (0.072%, 0.147% y 0.211%), el tipo de anclaje de la malla (clavos para madera y sujetadores comerciales) y la separación del anclaje (30 cm y 45 cm). En la figura 16 se presentan las envolventes de la respuesta experimental de cada muro. Durante las pruebas se observo que los muros reforzados con malla de alambre electrosoldada y el recubrimiento de mortero mostraron una distribución más uniforme del agrietamiento comparados con la respuesta de un muro sin refuerzo. Asimismo, se observo que los clavos de madera así como fijadores comerciales resultaron efectivos para el anclaje de los mallas. Como se observa en la figura 15, el refuerzo con malla de alambre incremento considerablemente la resistencia a esfuerzos de corte, la rigidez inicial y la capacidad de deformación lateral de los muros de mampostería (M-147, M-072, M-211) comparados con el espécimen de control sin refuerzo (MO).

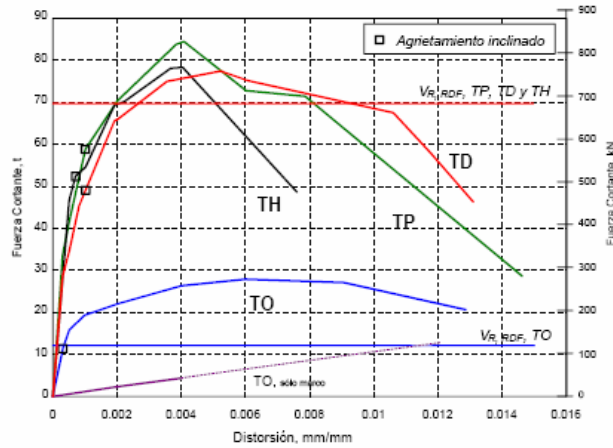


**Figura 15** Envolventes de respuesta de muros reforzados con mallas de alambre electrosoldado (Alcocer et al., 1996; Zepeda et al., 1996)

Asimismo, la eficiencia de esta técnica para el refuerzo de muros diafragma de mampostería construidos con bloque hueco de concreto sin daño previo fue evaluada por Flores et al. (1999). Para ello, se ensayaron tres muros a escala natural ante carga cíclica alternada que fueron reforzados con malla de alambre electrosoldada 6x6-4/4 (ver figura 16) y recubierta con mortero. Las variables en estudio fueron el tipo de anclaje de la malla (barras de acero o conectores comerciales) y su distribución (perimetral en el marco de concreto o bien distribuido en el muro). Su respuesta experimental se comparo con un espécimen que no contaba con refuerzo. En la figura 16 se muestra la envolvente de respuesta de los especímenes ensayados. Como puede apreciarse, el incremento en resistencia ante cargas laterales y rigidez inicial fue significativo. Sin embargo, debe notarse que los muros reforzados mostraron un deterioro de resistencia acelerado una vez alcanzada la capacidad máxima ante cargas laterales debido al desprendimiento del recubrimiento y de los anclajes.

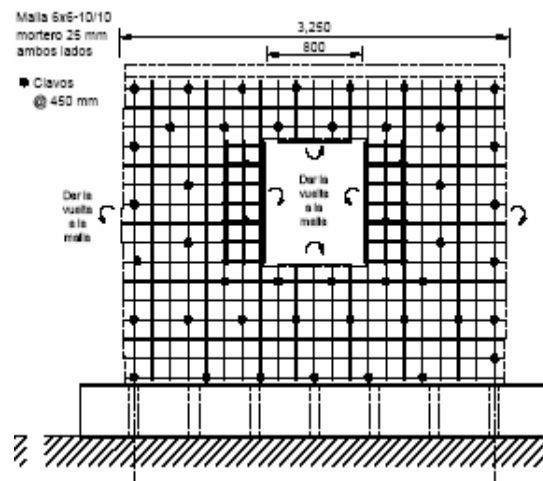


**Figura 16** Muros diafragma de mampostería de bloque hueco de concreto reforzados con mallas de alambre electrosoldado ensayados por Flores et al. (1999)

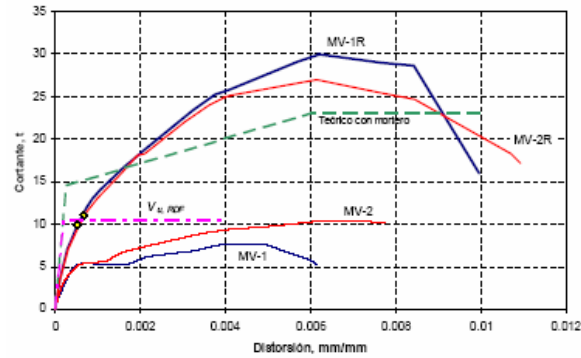


**Figura 17 Envolventes de respuesta de muros diafragma de mampostería de bloque hueco de concreto reforzados con mallas de alambre electrosoldado (Flores et al., 1999)**

Recientemente, Flores et al. (2004) estudiaron el comportamiento de dos muros de mampostería construidos con piezas de tabique rojo artesanal con una abertura al centro en forma de ventana, los cuales fueron rehabilitados con malla de alambre electrosoldado y recubrimiento de mortero. En la figura 19 se muestra la geometría de los muros ensayados y la disposición de los anclajes para fijar la malla. Ambos muros fueron inicialmente ensayados y llevados a un nivel de daño severo, con grietas de más de 10 mm en la superficie de los muros que penetraron los extremos de los castillos. El proceso de rehabilitación incluyó la reparación de los extremos de los castillos, el relleno de grietas de más de 3 mm con motero cemento-arena y la colocación de malla electrosoldada 6x6-10/10, rodeando los bordes del muro en los extremos y en la abertura. Cabe notar que el refuerzo se colocó en ambas caras del muro. En la figura 20 se muestra la envolvente de respuesta de los especímenes ensayados. Entre sus conclusiones, los autores observaron que los muros rehabilitados incrementaron significativamente la capacidad ante cargas laterales, en 3.9 y 2.6 veces, de los muros sin daño previo. Asimismo, también se observó un incremento en la rigidez inicial y la capacidad de deformación lateral de los muros rehabilitados.



**Figura 18 Geometría y disposición de los anclajes en los muros ensayados por Flores et al. (2004)**



**Figura 19** Envolvente de respuesta de los muros rehabilitados con malla de alambre (MV-1R y MV-2R) ensayados por Flores et al. (2004)

### USO DE FLEJES DE ACERO O PLÁSTICO

Recientemente, Ramírez y Carreón (2002) evaluaron experimentalmente el uso de flejes de acero o plástico para la reparación y/o refuerzo de muros de mampostería como se ilustra en la figura 20. Los flejes de acero se colocaron en la diagonal del muro por medio de ángulos metálicos con eslabones como técnica de reparación para muros de mampostería confinada con grado de daño considerado como grave (ver figura 20b), mientras que los flejes de plástico se colocaron horizontalmente y se adhirieron con resina epóxica y fibra de vidrio a la superficie del muro, previo tensado de los flejes, como técnica de refuerzo en muros de mampostería sin daño previo (ver figura 20a).

Con base en los resultados experimentales obtenidos de dos muros de 2.60 m de largo por 2.30 m de altura, sin y con confinamiento mediante dadas y castillos, los autores indican que esta técnica permite la recuperación e incremento en la capacidad ante cargas laterales de muros de mampostería confinada con daño previo, del orden de 1.21 a 1.59 veces con respecto a los muros originales, así como un incremento en la capacidad de deformación lateral, del orden de 2.5 a 7.5 veces con respecto al muro original, y de disipación de energía. Este comportamiento se atribuye al efecto de confinamiento que proporcionan los flejes metálicos ante cargas laterales alternadas.



(a)



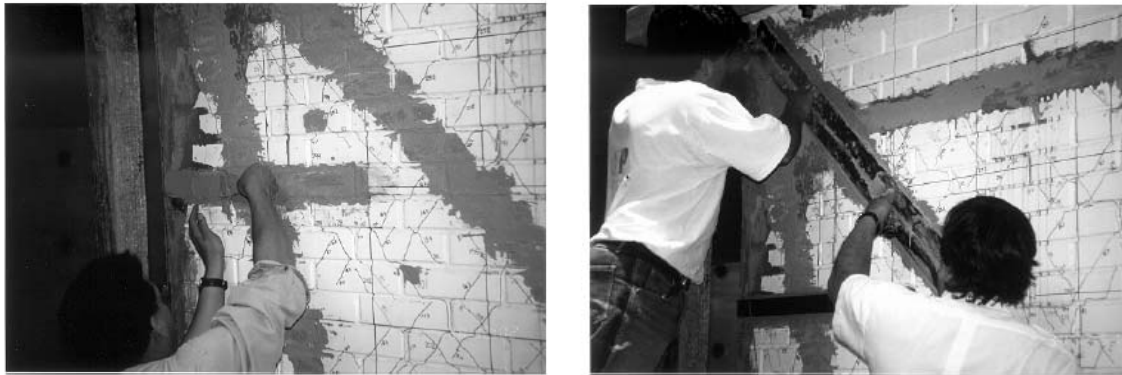
(b)

**Figura 20** Empleo de flejes metálicos o de plástico para: a) reparación, y b) refuerzo, de muros de mampostería confinada (Ramírez y Carreón, 2002)



## EMPLEO DE BANDAS FABRICADAS CON FIBRAS DE CARBÓN

Uno de los estudios pioneros llevados a cabo en México para evaluar la efectividad de bandas fabricadas con fibras de carbón como técnica de rehabilitación estructural para muros de mampostería confinada se menciona en Alcocer (2003). El autor menciona que el uso de materiales sintéticos permite un incremento en la capacidad máxima ante cargas laterales, así como de deformación lateral, lo cual se atribuye a la gran capacidad a esfuerzos de tensión que proporcionan las bandas cuando el muro es sometido ante cargas laterales alternadas en su plano. Por ello, se recomienda colocar bandas unidireccionales, con las fibras orientadas de modo que crucen perpendicularmente a las grietas inclinadas como se ilustra en la figura 21.



**Figura 21 Empleo de bandas de fibras de carbón para la rehabilitación de muros de mampostería: a) preparación de la superficie mediante resina epóxica, y b) colocación de la banda de fibra de carbón (Alcocer, 2003)**

## CONSIDERACIONES PARA LA REHABILITACION SISMICA DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERIA PARA VIVIENDA EMPLEANDO MALLA DE ALAMBRE

Una revisión de la literatura existente sobre el comportamiento experimental de técnicas de rehabilitación sísmica para estructuras de mampostería permite identificar el uso de malla de alambre como una técnica altamente factible y eficiente para la rehabilitación sísmica de edificaciones de mampostería para vivienda. Por ello, en esta sección se presentan algunas consideraciones para el diseño de este esquema de rehabilitación, así como consideraciones constructivas para su correcta aplicación.

### DISEÑO DEL ESQUEMA DE REHABILITACIÓN

#### Criterio de diseño

Una vez que se determino emplear malla de alambre electrosoldado como esquema de rehabilitación muros de mampostería se debe proceder a su diseño. Es decir, determinar el tipo y cantidad de malla a emplear para resistir las cargas laterales actuantes, su colocación (una o ambas caras del muro) y el número de anclajes. Para ello, puede emplearse el criterio propuesto por Ruiz y Alcocer (1998). Este criterio establece lo siguiente:

$$V_{R,R} \geq V_b \quad (1)$$

Donde  $V_{R,R}$  es la resistencia a fuerza cortante de la estructura rehabilitada con malla de alambre electrosoldada y  $V_b$  es la fuerza cortante basal actuante.

Una aproximación de la resistencia ante cargas laterales de una estructura rehabilitada con malla de alambre electrosoldado y recubierta con mortero de cemento esta dada por la siguiente expresión (Ruiz y Alcocer, 1998):

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

Donde  $V_{rm}$  es la resistencia remanente del muro de mampostería ante cargas laterales y  $V_{sm}$  es la contribución de la malla de alambre a la resistencia ante cargas laterales.

### Resistencia a cortante remanente de la mampostería

La resistencia a cortante remanente de los muros que han sufrido daño incluye la contribución de la mampostería, así como de los elementos confinantes. De acuerdo con Ruiz y Alcocer (1998), una estimación de la resistencia remanente puede obtenerse a partir de la resistencia a cortante de la mampostería señalada en la normatividad vigente, como límite superior de esta contribución. La resistencia remanente de la mampostería,  $V_{rm}$ , esta dada por la siguiente expresión:

$$V_{rm} = F_R \cdot V_R \quad (3)$$

Donde  $V_R$  es la resistencia a fuerza cortante de la mampostería, calculada con la ec. (5.7) incluida en las Nomas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de mampostería (NTCM, 2004) y  $F_R$  es un factor de reducción de resistencia que puede considerarse como 0.8.

Cabe mencionar que para estimar  $V_{rm}$  se deberán considerar las características mecánicas reales de la mampostería, dada la gran dispersión en las propiedades mecánicas de la mampostería provenientes de distintas regiones, y no se recomienda usar la resistencia de diseño,  $v^*$ , recomendada por las normas vigentes. Asimismo, es recomendable realizar ensayos para medir la resistencia a cortante de la mampostería.

### Resistencia a cortante proporcionada por la malla de alambre

Una buena aproximación a la resistencia a fuerza cortante que proporciona la malla de alambre,  $V_{sm}$ , esta dada por la siguiente expresión (Ruiz, 1995; Ruiz y Alcocer, 1998):

$$V_{sm} = \rho_h \cdot f_y \cdot A_T \cdot \eta \quad (4)$$

Donde  $\rho_h$  es la cuantía de refuerzo horizontal, proporcionada por la malla de alambre electrosoldada,  $f_y$  es el esfuerzo nominal de fluencia de los alambres de la malla de alambre,  $A_T$  es el área bruta de la sección transversal del muro de mampostería y  $\eta$  es un factor de eficiencia del refuerzo horizontal. Para el cálculo de la cuantía se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_h = \frac{a_{sh}}{t \cdot s_h} \quad (5)$$



Donde  $t$  es el espesor del muro de mampostería,  $a_{sh}$  es el área de acero de los alambres horizontales de la malla en una separación  $s_h$ , y  $s_h$  es la separación horizontal de los alambres de la malla.

En la ec. 5,  $\eta$  es un factor de eficiencia que toma en cuenta que los alambres de la malla exhiben una distribución de deformaciones uniforme en la altura del muro y, en consecuencia no alcanzan su esfuerzo de fluencia simultáneamente en la altura del muro (Ruiz, 1995). Con base en evidencia experimental, Ruiz (1995, 1998) observo que este factor depende del nivel de deformación lateral del muro, la densidad de anclajes y la relación de aspecto de los muros (ver figura 21). Posteriormente, con base en resultados experimentales, Aguilar y Alcocer (2001) sugieren que el factor de eficiencia también depende de la cuantía de refuerzo horizontal (ver figura 22). Sus observaciones fueron posteriormente incorporadas en las NTCM-04 (2004) de acuerdo al siguiente criterio:

$$\eta = \begin{cases} 0.6; & \text{si } \rho_h f_{yh} \leq 6 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.2; & \text{si } \rho_h f_{yh} \geq 9 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (6)$$

para valores de  $\rho_h f_{yh}$  entre 6 y 9  $\text{kg/cm}^2$  se variara linealmente.

Finalmente, cabe mencionar que la ec. 4 fue incluida en la última edición de las NTCM-04 (2004), pero afectada por un factor de reducción de resistencia,  $F_R$ .

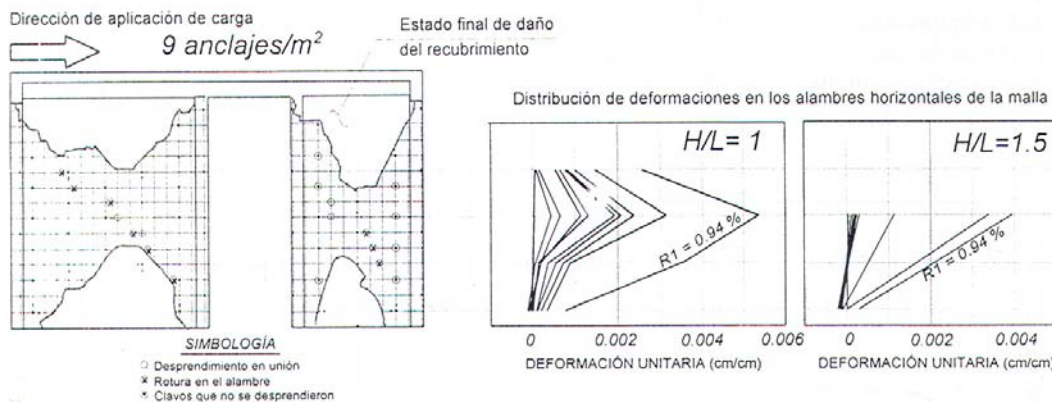


Figura 21 Distribución de deformaciones en los alambres de la malla colocada en la cara norte del modelo 3D-R ensayado por Ruiz (1995)

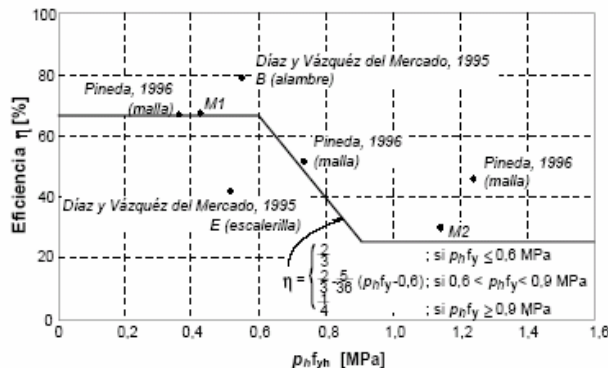
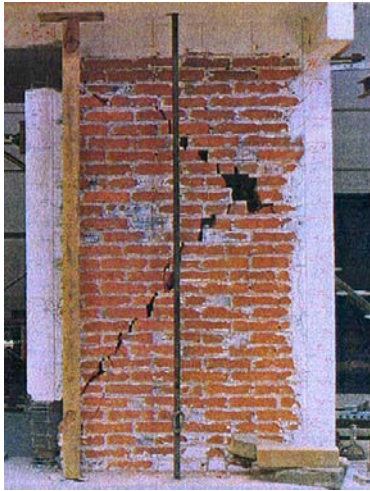


Figura 22 Factor de eficiencia del refuerzo horizontal (Aguilar y Alcocer, 2001)

## PROCESO CONSTRUCTIVO

### Preparación de las grietas y superficie de los muros

A fin de lograr un comportamiento adecuado de esta técnica de rehabilitación, es necesario realizar algunas preparaciones en la superficie de los muros dañados antes de la colocación de la malla de alambre y su recubrimiento de mortero. En principio, se sugiere retirar los fragmentos y piezas sueltas de las grietas, principalmente en las zonas más dañadas, así como 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), como se ilustra en la figura 23a. 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 rellenar las grietas inclinadas en la superficie de la mampostería con mortero de cemento y en zonas muy dañadas es recomendable sustituir las piezas agrietadas por piezas nuevas como se ilustra en la figura 23b. 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) y no se considera necesario el uso de resinas para el relleno de las grietas. En la figura 24 se ilustra un muro tipo de mampostería confinada antes y después de la preparación para colocar la malla electrosoldada.



(a)



(b)

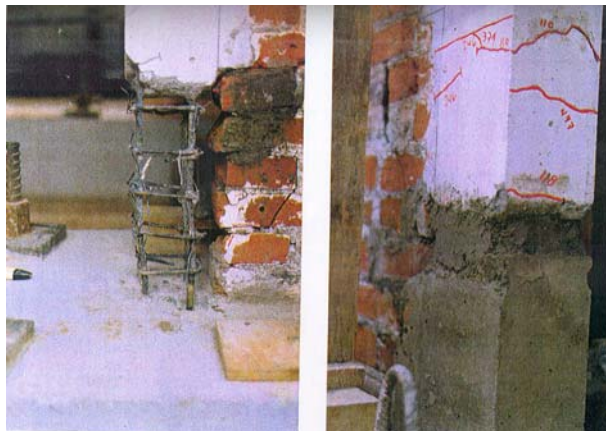
**Figura 23 a) Preparación de la superficie de muros dañados (Ruiz, 1995), y b) sustitución de las piezas dañadas por piezas nuevas (Flores et al., 2004)**



**Figura 24** Muro de mampostería confinada antes y después de la preparación de la superficie para la colocación de malla electrosoldada (Ruiz, 1995)

### Reparación local de los castillos

En caso de encontrarse dañados los castillos (por ejemplo, con desconchamiento del recubrimiento y parte del núcleo de concreto, plegamiento de los castillos 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. (ver figura 25).

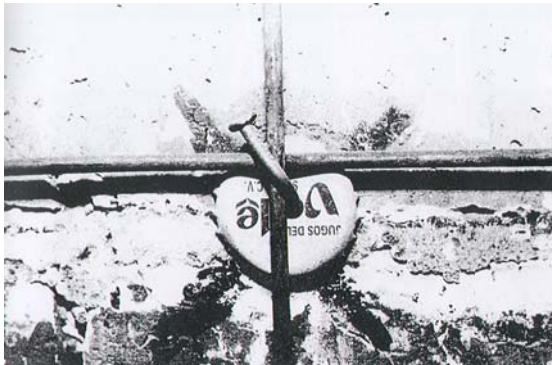


**Figura 25** Reparación local de los extremos de los castillos (Ruiz, 1995)

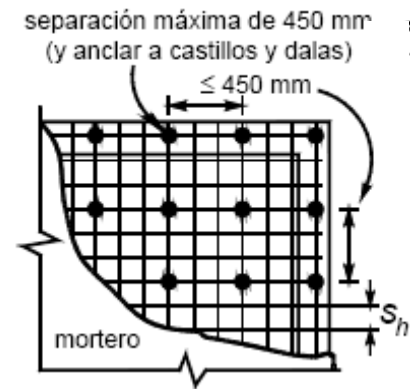
La evidencia experimental ha demostrado que la contribución del mecanismo de dovola del refuerzo longitudinal ha sido benéfico para sostener la capacidad de deformación y aumentar la capacidad ante cargas laterales por encima de la carga de agrietamiento, por lo que se sugiere reforzar los extremos de los castillos con estribos cerrados a cada hilada o a  $d_c/2$  (lo que resulten una menor separación) en una longitud no menor de  $1/6$  de su altura libre,  $4 d_c$ , ni que 40 cm., donde  $d_c$  es el peralte del castillo (Alcocer, 1997).

## Anclaje

Con la intención de distribuir el agrietamiento en forma uniforme y obtener un comportamiento estable y con amplia disipación de energía, se sugiere utilizar una densidad mínima de 9 anclajes/m<sup>2</sup>. A manera de anclaje, se pueden usar clavos de madera de 64 mm de longitud, colocados manualmente con martillo (ver figura 26a), con una separación vertical y horizontal máxima 45 cm (ver figura 26b). Cabe notar que este tipo de anclaje se ha evaluado experimentalmente para mallas electrosoldadas de 3.4 mm de diámetro (calibre 10)(Ruiz, 1995).



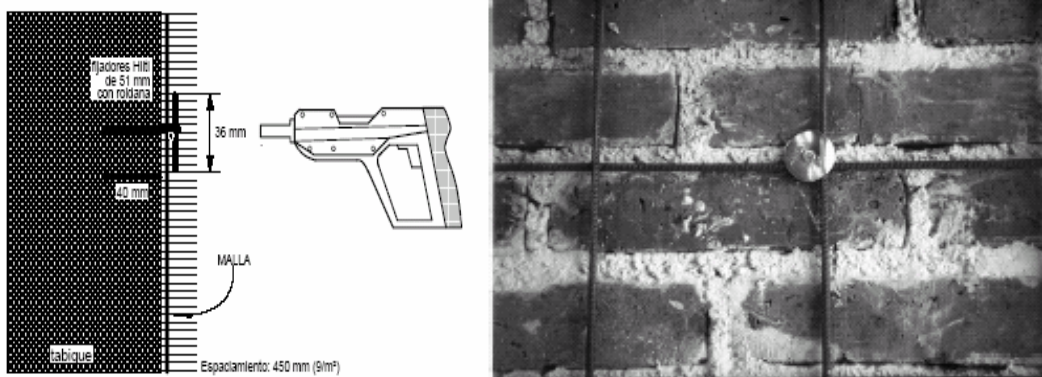
(a)



(b)

**Figura 26 a) Fijación de la malla al muro con clavo (Ruiz, 1995, y b) separación máxima del anclaje (NTCM, 2004)**

Alternativamente, se pueden emplear conectores comerciales colocados a través de una carga explosiva controlada cuando el calibre de la malla es mayor a 6.4 mm, atendiendo las recomendaciones de densidad y espaciamiento mencionadas anteriormente, como se ilustra en la figura 27. La evidencia experimental ha evidenciado un buen comportamiento cuando se emplean este tipo de anclajes (Alcocer et al., 1996).



**Figura 27 Malla metálica anclada a un muro de mampostería con conectores comerciales (Alcocer, 2003)**



### Colocación de la malla

Adicionalmente al número de anclajes en la superficie de los muros, se sugiere que los bordes de la malla se sujeten a los castillos y dadas mediante anclajes adicionales. Asimismo, se debe buscar que la malla de alambre rodee los castillos, así como los bordes en puertas y ventanas atendiendo las disposiciones de las NTCM (2004), como se ilustra en la figura 28. Para fines de determinar la longitud de traslape, se pueden emplear las recomendaciones para el diseño de elementos de concreto reforzado. En ocasiones, cuando se coloque la malla de alambre por ambas caras, será necesaria la colocación de anclajes adicionales instalados en barrenos para fijar ambas mallas. Esto puede ocurrir en la intersección de muros ortogonales, como se ilustra en la figura 29. Finalmente, la colocación del mortero de recubrimiento puede ser en forma manual, o bien con dispositivos neumáticos (lanzado). La evidencia experimental ha mostrado que ambas técnicas permiten un incremento en la resistencia ante cargas laterales (Ruiz, 1995). Sin embargo, en un proyecto masivo de rehabilitación de edificaciones para viviendas multifamiliares, el costo de la mano de obra puede hacer que la aplicación vía neumática sea una opción atractiva. En cualquier caso, antes de aplicar el mortero, se debe saturar la superficie del muro como se ilustra en la figura 30.

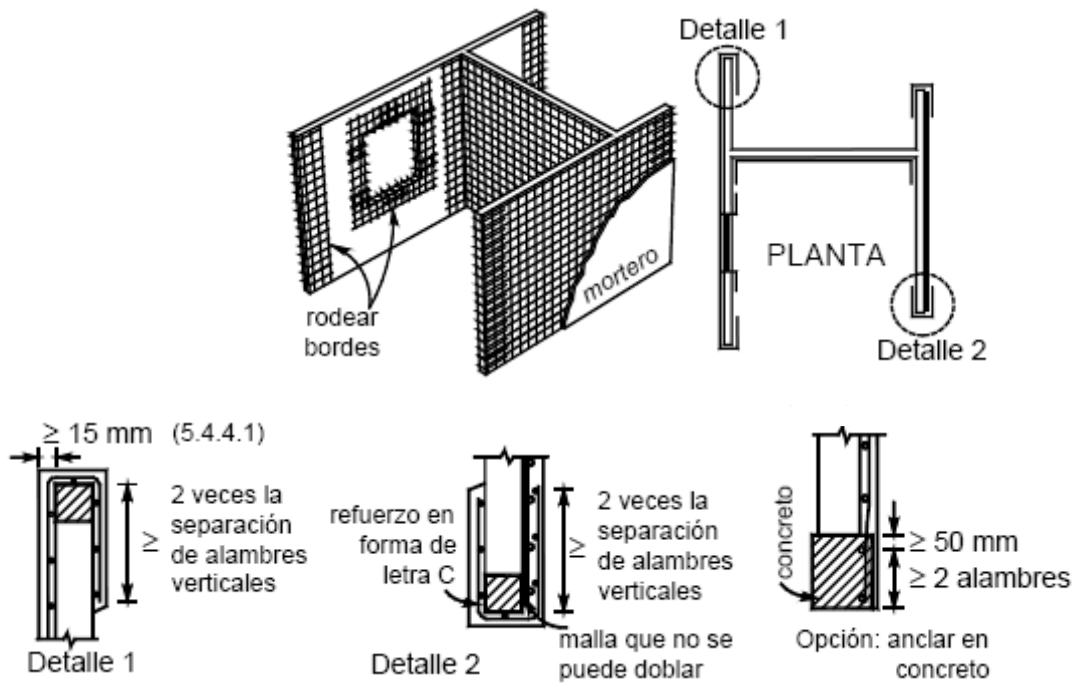
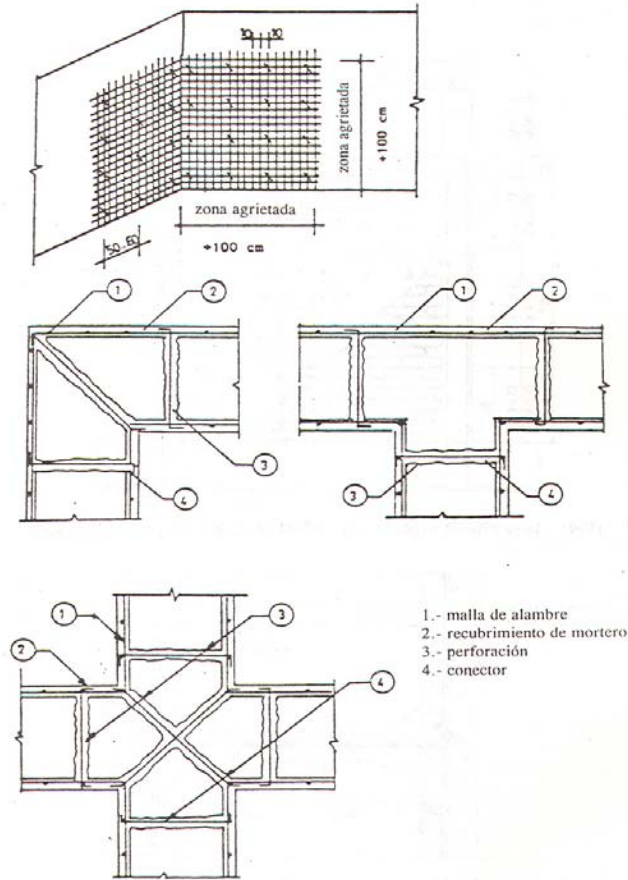


Figura 28 Disposiciones normativas para la colocación de malla de alambre en la superficie de los muros de mampostería (NTCM, 2004) (continuación)



**Figura 29 Detalle de la colocación de la malla en muros ortogonales (Ruiz, 1995)**



**Figura 30 Saturación de los muros de mampostería colocación del mortero para recubrir la malla de alambre (Ruiz, 1995)**





## REHABILITACIÓN SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA DE DOS NIVELES

### Descripción de la estructura

A continuación, se ejemplificara el proceso de rehabilitación estructural empleando malla de alambre electrosoldada para una casa habitación de dos niveles, construida a base de muros de carga de mampostería de tabique de barro recocido, la cual fue afectada por un evento sísmico (ver figura 31).

A fin de observar la influencia de la zonificación sísmica en el proceso de rehabilitación se consideran dos ubicaciones de la estructura en el estado de Michoacán: a) Ciudad de Morelia, y b) Puerto de Lázaro Cárdenas. La primera ubicación corresponde a la zona sísmica C mientras que la segunda corresponde a la zona sísmica D, de acuerdo al Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad Edición 1993 (CFE, 1993).

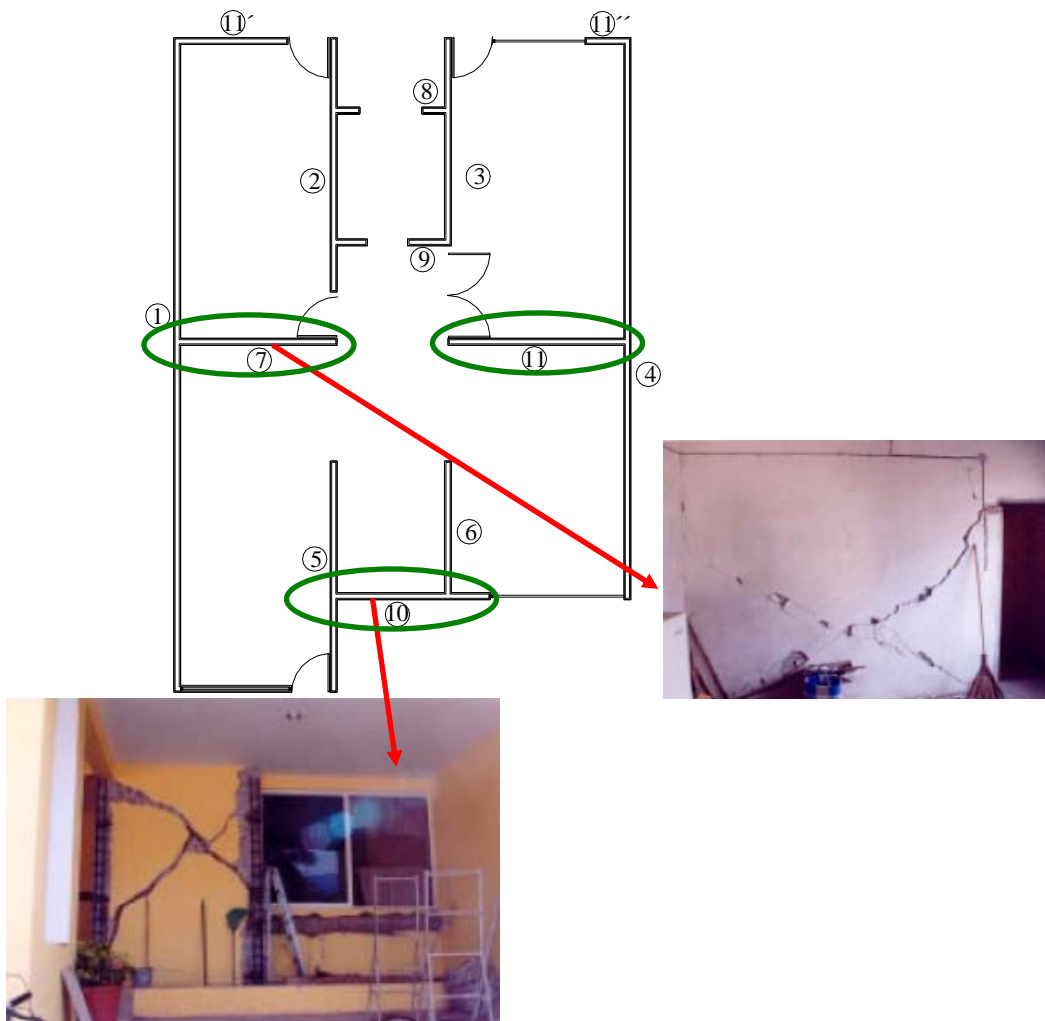


Figura 31 Distribución en planta de una edificación para vivienda dañada sísmicamente (Soto, 2007)

### Evaluación preliminar del nivel de daño

Como se describió anteriormente, se debe proceder a una evaluación preliminar para identificar y clasificar el tipo de daño, lo cual permitirá tomar una decisión acerca de si la estructura debe ser demolida, o bien si es factible su rehabilitación. Durante la evaluación preliminar del inmueble se debe prestar especial atención a los siguientes aspectos: a) Identificar si se trata de muros de mampostería confinada o reforzada; b) observar el deterioro de las piezas por la humedad o el intemperismo; c) evaluar la cantidad y distribución de los muros en ambas direcciones, la cantidad y disposición de las aberturas (puertas y ventanas); d) el espesor e inclinación de las grietas en la superficie de la mampostería y en las dalas o castillos, la extensión de las grietas inclinadas hasta los castillos; e) revisar si es posible si existió plegamiento de las varillas y si hubo aplastamiento del concreto en el recubrimiento.

En la figura 31 se muestra la ubicación y el estado de daño (supuesto) de los muros de mampostería 7, 10 y 11. Como puede observarse, los muros exhiben agrietamiento inclinado en forma de 'X', cuyo espesor es considerable. En algunos casos, el agrietamiento inclinado penetra los extremos de los castillos. Por ello, de acuerdo a tabla 3 el estado de daño de los muros se puede clasificar como *grave*, por lo cual es necesario realizar una rehabilitación a los elementos que han sido afectados.

### Revisión de la capacidad ante cargas laterales

La siguiente etapa consiste en evaluar la capacidad resistente ante cargas laterales de la edificación. Dicha evaluación puede realizarse mediante el método simplificado de análisis para estructuras de mampostería descrito en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad edición 93 (CFE, 1993) y el Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán (CICM, 1999). En principio, se deben revisar los requisitos de regularidad de la estructura y determinar si es aplicable el método simplificado de análisis. A partir de la distribución de muros en ambas plantas, ilustrado en la figura 31, se puede apreciar lo siguiente:

- Más del 75% de las cargas verticales son resistidas por los muros de mampostería.
- En ambas plantas existen 2 muros perimetrales, uno de 14 m y otro de 12 m, que representan el 100% y 85% de la longitud máxima de las plantas.
- La relación longitud-ancho es igual a 1.4, siendo menor al límite de 2.0
- La altura máxima de la construcción es de 5.0 m, inferior al límite de 13.0 m.
- La relación de altura y dimensión mínima es de 0.85, menor de 1.5.

Por lo anterior, es posible utilizar el método simplificado de análisis. El método simplificado de análisis consiste en comparar la fuerza cortante actuante en la base del inmueble,  $V_b$ , con la resistencia a fuerza cortante proporcionada por los muros de mampostería,  $V_R$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_b \leq V_R \quad (7)$$

Donde

$$V_b = c'_s \cdot W_T \quad (8)$$

$$V_R = F_R (0.5v^* A_T + 0.3P) \quad (9)$$



Siendo  $W_T$  el peso del inmueble para análisis sísmico,  $c_s'$  el coeficiente sísmico reducido,  $v^*$  el esfuerzo cortante de la mampostería,  $A_T$  el área de la sección transversal de los muros,  $P$  la carga axial que actúa sobre los muros y  $F_R$  es una factor de reducción de resistencia

De manera alterna, se puede estimar el esfuerzo cortante resistente,  $v_R$ , que proporcionan los muros de mampostería en cada dirección de análisis:

$$v_R = F_R (\sum A_T) (0.5v_m^* + 0.3f_a) \leq 1.5F_R v_m^* (\sum A_T) \quad (10)$$

Siendo  $\sum A_T$  la sumatoria de las áreas brutas de las secciones transversales de los muros y  $f_a$  el esfuerzo debido a carga axial en el entrepiso, igual a la carga total dividida entre las áreas de los muros. En este estudio se considero un esfuerzo medio a compresión  $f_a$  igual a 1.125 kg/cm<sup>2</sup> para el cálculo del esfuerzo cortante resistente de la mampostería.

En la tabla 4 se presentan los valores de  $c_s'$  y  $v^*$  considerados para cada ubicación de la estructura. El valor de  $c_s'$  se adopto de la tabla 4 del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad edición 93 (CFE, 1993), mientras que los valores de  $v^*$  se adoptaron de acuerdo a un estudio estadístico sobre las propiedades mecánicas de piezas típicas de mampostería en el Estado de Michoacán (Alarcón y Alcocer, 1999).

**Tabla 4 Valores de  $c_s'$  y  $v^*$  para las dos opciones**

Ubicación	Zona sísmica	Tipo de Terreno	$c_s'$	$v^*$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Morelia	C	III	0.32	4.80
Lázaro Cárdenas	D	III	0.43	5.45

Para el cálculo de la fuerza cortante lateral se consideraron un peso de 132 ton en el segundo nivel (nivel de azotea) y un peso de 109 ton en el primer piso. De esta manera, se evaluaron las ecs. 8 y 9 para estimar  $V_b$  y  $V_R$  en cada dirección de análisis. En la tabla 5 se resumen los resultados obtenidos. Como podemos apreciar el cortante que actúa en la base de la estructura es superior al cortante que resiste la estructura en su lado corto, lo cual explica el daño observado en los muros de mampostería.

**Tabla 5 Cortante basal y fuerza cortante resistente de la mampostería de la estructura de dos niveles**

Ubicación	Zona sísmica	$V_b$ [ton]	$V_R$ [ton]	
			Lado corto	Lado Largo
Morelia	C	84.83	32.99	98.8
Lázaro Cárdenas	D	114.0	40.0	119.0

### Diseño del esquema de rehabilitación empleando malla de alambre electrosoldada y recubierta con mortero

Para fines de ilustración del proceso de rehabilitación estructural, se considera adecuado emplear malla de alambre electrosoldado dado el estado de daño observado en los muros de mampostería. Para ello, se procedió diseñar este esquema de acuerdo al criterio descrito anteriormente (Ruiz y Alcocer, 1998), el cual consiste en evaluar la ecs. 2 a 6. Así, se evaluó la resistencia a cortante  $V_{sm}$  que proporcionaban dos tipos de malla de alambre electrosoldado de uso común: 6x6/10-10 y 10x10/10-10. La fabricación de las mallas se realiza con alambres de acero estirados en frío, unidos entre si en forma perpendicular por resistencia eléctrica, generando mallas cuadrículadas que deben satisfacer las especificaciones de la norma NMX- B-290. Las características de ambos tipos de malla se presentan en las tablas 6 y 7.

**Tabla 6 Características de la malla electrosoldada**

Tipo	Diámetro (mm)	Área de acero (cm <sup>2</sup> /m)	Peso (kg/m <sup>2</sup> )	Peso (kg/rollo)
6x6/10-10	3.43	0.606	0.95	192/200
10x10/10-10	3.43	0.606	0.78	156/200

**Tabla 7 Datos del alambre**

Calibre	Diámetro (mm.)	Área de acero (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m <sup>2</sup> )	$f_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
10	3.43	0.0923	0.0923	5000	5700

Para el cálculo de la contribución de la malla de alambre electrosoldado se pueden considerar cuatro distintas opciones:

- Colocación de la malla 10x10/10-10 en una sola cara de los muros.
- Colocación de la malla 6x6/10-10 en una sola cara de los muros.
- Colocación de la malla 10x10/10-10 en ambas caras de los muros.
- Colocación de la malla 6x6/10-10 en ambas caras de los muros.

Para la estimación del factor de eficiencia se realizó el calculo de  $\rho_h \cdot f_y$  de acuerdo a la ec. 6 y se determinó que era menor a 6 kg/cm<sup>2</sup>, por lo cual  $\eta$  se tomo con un valor igual a 0.6 (60% de eficiencia de los alambre horizontales de la malla). Para la estimación de la capacidad remanente de los muros dañados se considero un factor de reducción de resistencia igual a 0.8.

De esta manera, la resistencia ante cargas laterales de las dos viviendas ubicadas en la ciudad de Morelia y Lázaro Cárdenas considerando las cuatro opciones de rehabilitación se presenta en las tablas 8 y 9.



**Tabla 8 Fuerzas cortantes resistentes de la vivienda unifamiliar ubicada en la ciudad de Morelia**

$V_R$ Cortante resistente ante cargas laterales sin contribución de la malla de alambre (Lado corto)	Cortante actuante	Cortante resistente considerando la contribución de la malla de alambre electrosoldada y la capacidad remanente			
		10x10/10-10 1 CARA	6x6 /10-10 1 CARA	10x10/1010 2 CARAS	6x6/10-10 2 CARAS
32.99 ton	84.83 ton	59.09	80.63	116.24	159.32
No cumple		No cumple	No cumple	<b>Si cumple</b>	<b>Si cumple</b>

**Tabla 9 Fuerzas cortantes resistentes de la vivienda unifamiliar ubicada en el Puerto de Lázaro Cárdenas**

$V_R$ Cortante resistente ante cargas laterales sin contribución de la malla de alambre (Lado corto)	Cortante actuante	Cortante resistente considerando la contribución de la malla de alambre electrosoldada y la capacidad remanente			
		10x10/10-10 1 CARA	6x6 /10-10 1 CARA	10x10/1010 2 CARAS	6x6/10-10 2 CARAS
36.91 ton	114 ton	62.27	83.81	122.37	165.45
No cumple		No cumple	No cumple	<b>Si cumple</b>	<b>Si cumple</b>

Considerando la ubicación en la ciudad de Morelia, se puede apreciar que colocar malla 10x10/10-10 en una sola cara sería insuficiente para resistir la fuerza cortante que actúa en la estructura. Para las dos opciones restantes, el cortante resistente es mayor al que actúa. Por ello, colocar malla de alambre electrosoldado 10x10/10-10 por ambas caras representa la mejor opción.

Para la ubicación en Lázaro Cárdenas, también se puede apreciar que colocar malla 10x10/10-10 y malla 6x6/10-10 por una cara conduciría a una capacidad insuficiente para resistir la fuerza cortante actuante. Puede verse que el objetivo de la rehabilitación sísmica se logra colocando malla 10x10/10-10 por ambas caras de los muros.

### COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se presentó una revisión de las técnicas de rehabilitación estructural aplicables en edificaciones de mampostería para vivienda. En particular, se presentaron recomendaciones a seguir cuando se emplea malla de alambre recubierta con mortero de cemento como esquema de rehabilitación, la cual es una técnica comúnmente empleada en la práctica profesional. A continuación se ofrecen los siguientes comentarios finales:

- La toma de decisión acerca de la rehabilitación estructural o demolición de una edificación de mampostería requiere de una adecuada evaluación para determinar su grado de daño.
- El uso de la malla de alambre como técnica de rehabilitación estructural para estructuras de mampostería resulta una opción muy atractiva. La malla de alambre recubierta con mortero es

relativamente fácil de aplicar, no requiere supervisión especializada y es relativamente económica respecto a otras técnicas descritas en este trabajo.

- Existe evidencia experimental que indica que el uso de la malla electrosoldada adosada a la superficie de los muros de mampostería que han sufrido daño contribuye a un aumento en la resistencia ante cargas laterales y en la capacidad de deformación lateral respecto al comportamiento de muros sin daño previo. Dicha contribución depende de la cuantía del refuerzo horizontal, el factor de eficiencia  $\eta$ , así como el tipo y densidad de anclaje. Esta técnica de rehabilitación favorece a que la distribución del agrietamiento sea más uniforme en la superficie del muro.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración del Ing. Emmanuel Soto Pompa en el desarrollo del ejemplo que se presenta, el cual se incluye en su tesis de licenciatura. Asimismo, el autor quisiera agradecer las facilidades brindadas por la *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo* para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Alarcón, P., y Alcocer S.M. (1997), **“Repercusión de las características mecánicas de la mampostería en el diseño sísmico”**, Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol. I, Veracruz, pp. 625-634.

Alcocer, S.M., Ruiz J., Pineda J.A., y Zepeda J.A. (1996), **“Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh”**, Memorias de la 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México, artículo No. 1471.

Alcocer, S.M. (1997), **“Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión”**, Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol. I, Artículo de estado del arte, Veracruz, Ver.

Alcocer, S.M., Aguilar, G., Flores, L., Bitrán, D., Duran, R., López, O.A., Pacheco, M.A., Reyes, C., Uribe, C.M., Mendoza, M.J. (1999), **“El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999”**, Informe IEG/02/99, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 159 pp.

Alcocer, S.M., Reyes, C., Flores, L., Duran, R., Lopez, O.A., Domínguez, L., Echevarría, A., y Pacheco, (2003), **“El sismo de Tehuacán del 21 de enero de 2003, danos en el estado de Jalisco”**, Informe Interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

Alcocer, S. M. (2003), **“Capítulo 11: Rehabilitación de estructuras de mampostería”**, en: Edificaciones de mampostería para vivienda, Fundación ICA-SMIE y Editorial Limusa, México.

Águila, V., Delfín, F., y Astroza, M. (1988), **“Estudio experimental de soluciones de reparación y refuerzo para elementos de albañilería”**, Universidad de Chile, Publicación SES I 1/88 (221), Santiago.

Aguilar, G., y Alcocer, S.M. (2001), **“Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales”**, Reporte de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 181 pp.

Colegio de Ingenieros Civiles de Michoacán, (CICM, 1999), **Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán**.

Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), **“Manual de obras civiles”**, México, DF.



Delfín, F., Astroza, M., Águila, V., y Cortés, R. (1992), **“Evaluación de la eficiencia de soluciones de reparación para muros con daños del tipo sísmico en muros de albañilería confinada”**, Memorias del Primer Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y Tercero de Control de Calidad, Córdoba, Argentina.

Departamento del Distrito Federal (DDF, 1993), **“Reglamento de construcciones para el Distrito Federal”**, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F.

Earthquake Engineering Research Center (EERI), **“The Tecoman, Mexico earthquake January 21, 2003”**, EERI-SMIS Reconnaissance Report 2006.

Flores, L.E., Marcelino, J., Lazalde, G., y Alcocer S.M. (1999), **“Estudio de la rehabilitación de centrales telefónicas empleando malla y aplanado de concreto”**, Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol. I, Morelia, Mich., México, noviembre.

Flores, L.E., Mendoza, J.A., y Reyes C. (2004), **“Ensayo de muros de mampostería con y sin refuerzo alrededor de la abertura”**, Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (en CD), Acapulco.

Hernández, O., (1981) **“Procedimientos de reparación de estructuras dañadas por sismo” (Primera etapa)**, Proyecto de investigación No 0731, Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Hidalgo, P., Luders, C., y de la Llera, J.C. (1991), **“Diseño y recuperación de edificios estructurados con muros”**, Informe DIE 91-2, Pontificia Universidad Católica de Chile, 115 pp.

Iglesias, J., Robles, F., de la Cera, J., y Gonzáles, O.M., (1988), **“Manual de reparación de estructuras de concreto y mampostería”**, Primera edición, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México D.F.

Jara, J.M., Rojas, R., Olmos, B.A. (2005), **“Comportamiento de edificaciones durante el temblor de Colima del 21 de enero del 2003”**, Ciencia Nicolaíta, No. 41, Coordinación de Inv. Científica, UMSNH, pp. 209-224.

Jean, R., y Pérez, J.A. (2003), **“Capítulo 7: Análisis, revisión y detallado de estructuras de mampostería”**, en: Edificaciones de mampostería para vivienda, Fundación ICA-SMIE y Editorial Limusa, México.

Ramírez, H., y Carreón, B. (2002), **“Reparación y refuerzo de muros de mampostería de tabique de arcilla para vivienda de bajo costo”**, Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla.

Reglamento de construcciones para el Distrito Federal (2004) **Normas Técnicas Complementarias para diseño de mampostería**, Gaceta oficial, Gobierno del Distrito Federal.

Rodríguez, M., y Castrillón E. (1995), **“Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones”**, Informe No. 569, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 84 pp.

Rodríguez, M. (2004), **“Un enfoque alternativo para la evaluación y el diseño de edificaciones de mampostería en zonas sísmicas”**, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 70, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., pp. 27-58.

Ruiz, J. (1995), **“Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural”**, Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de ingeniería, UNAM, México, 251 pp.

Ruiz, J., y Alcocer, S.M. (1998), **“Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de malla de alambre”**, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 59, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., pp. 59-79.

Ruiz, J., Sánchez, T.A., y Miranda, E. (2003), **“Capítulo 6: Observaciones sobre el comportamiento y diseño de mampostería en zonas sísmicas”**, en: Edificaciones de mampostería para vivienda, Fundación ICA-SMIE y Editorial Limusa, México.

San Bartolomé A. (1990), **“Albañilería confinada”**, Colección del Ingeniero Civil, Libro No. 4, Colegio de Ingenieros Civiles del Perú, Lima.

Soto, E. (2007), **“Rehabilitación sísmica de estructuras de mampostería mediante el uso de malla de alambre y recubrimiento de mortero”**, Tesis de Licenciatura, Fac. de Ing. Civil, Univ. Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 93 pp.

Zepeda, J.A., Pineda, J.A., y Alcocer, S.M. (1996), **“Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada”**, Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería estructural, Vol. II, Mérida, pp. 919-925.