

UNIVERSIDAD DON VASCO, A. C.

Incorporación No. 8727-15

a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Escuela de Ingeniería Civil.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA DAÑADAS POR SISMO.

Tesis

que para obtener el título de

Ingeniero Civil

presenta :

Gabriela Jiménez Villanueva

Asesor: M.I. Enrique Omar Navarro Caballero.

Uruapan, Michoacán, Marzo, 2010.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mi hija, como estímulo para que siempre supere sus obstáculos y logre alcanzar sus sueños y tenga una oportunidad para abrir la mente, la emoción, la intuición y adquiera un mayor conocimiento.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme realizar un sueño más en mi vida.

A mi esposo por su amor y tolerancia.

A mis padres por su gran apoyo.

Y a toda mi familia.

ÍNDICE

Introducción.	
Antecedentes.	1
Planteamiento del problema.	2
Objetivo.	3
Pregunta de investigación.	4
Justificación.	4
Marco de referencia.	5
Capítulo 1.- La Mampostería.	
1.1.- Materiales más usados en la mampostería.	7
1.2.- Requisitos de los materiales para mampostería.	10
1.2.1.- Tipos de piezas.	10
1.2.2.- Piezas macizas.	11
1.2.3.- Piezas huecas.	11
1.2.4.- Resistencia a compresión.	12
1.2.5.- Mortero para pegar piezas.	13
1.3.- Acero de refuerzo.	14
Capítulo 2.- Efectos de los sismos en las construcciones de mampostería.	
2.1.- Origen de los sismos.	16
2.2.- Estudios de los sismos.	17
2.3.- Desempeño sísmico observado de edificaciones de mampostería.	18

2.3.1.-Edificaciones de adobe.	19
2.3.2.- Edificaciones de mampostería sin refuerzo.	21
2.3.3.- Edificaciones de mampostería confinada.	23
2.3.4.- Edificaciones de mampostería con refuerzo interior.	25
2.3.5.- Muros Diafragma.	28
2.3.6.- Estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería existentes.	30
2.4.- Aspectos a considerar en el diseño de estructuras de mampostería en zonas sísmicas.	32
2.4.1.- Normatividad.	32
2.4.2.- Calidad de los materiales.	33
2.4.3.- Influencia de las aberturas en muros de mampostería.	33
2.4.3.1.- Influencia de las aberturas en la rigidez lateral de la estructura.	33
2.4.3.2.- Influencia de las aberturas en la distribución de fuerzas cortantes.	35
2.4.4.- Importancia de la configuración estructural.	36
2.5.- Detallado del refuerzo en zonas sísmicas.	40
2.5.1.- Importancia de los castillos.	40
2.5.2.- Refuerzo transversal en castillos.	41
2.5.3.- Refuerzo horizontal mediante alambres corrugados.	42
2.5.4.- Refuerzo adicional mediante malla de alambre.	43
2.6.- Control de los desplazamientos laterales para limitar el daño estructural.	44
Capítulo 3.- Evaluación y análisis de construcciones de mampostería.	
3.1.- Evaluación de edificios existentes.	52

3.2.- Registro documental de diseño y construcción.	53
3.3.- Inspecciones.	53
3.4.- Propiedades de los materiales.	55
3.5.- Evaluación de grietas.	55
3.6.- Técnicas de evaluación y ensayos en sitio de estructuras de mampostería.	60
3.6.1.- Inspección visual.	61
3.6.2.- Martillo de rebote.	62
3.6.3.- Pruebas de extracción.	65
3.6.4.- Barrenado.	67
3.6.5.- Prueba de penetración.	67
3.6.6.- Ensayes a corte en el plano de piezas y elementos.	69
3.6.7.- Ensayes de probetas extraídas o corazones.	72
3.6.8.- Medición de la adherencia mortero-pieza.	72
3.6.9.- Gatos planos.	74
3.6.10.- Técnicas de transmisión de pulso.	78
3.6.10.1.- Velocidad de pulso ultrasónico.	79
3.6.11.- Métodos magnéticos.	80
3.6.12.- Radiografía.	81
3.6.13.- Termografía de rayos infrarrojos.	81
3.6.14.- Microondas.	83
3.6.15.- Resistividad de la mampostería.	83
3.6.16.- Propiedades de corrosión.	85
3.6.17.- Petrografía.	86

3.6.18.- Pruebas de carga.	86
----------------------------	----

Capítulo 4.- Técnicas de rehabilitación en base al daño observado.

4.1.- Decisiones para la rehabilitación.	87
4.1.1.- Medidas a tomar después de un sismo.	87
4.1.2.- Criterios para rehabilitar una estructura.	88
4.1.3.- Tipos de intervención en un edificio.	90
4.2.- Técnicas de rehabilitación.	90
4.2.1.- Conexión de nuevos elementos a la mampostería existente.	92
4.2.1.1.- Anclas.	92
4.2.1.2.- Conexiones mampostería-acero.	94
4.2.2.- Reemplazo de piezas y de concreto dañados.	95
4.2.3.- Reemplazo de las grietas.	96
4.2.3.1.- Inyección de resinas y morteros epóxicos.	97
4.2.3.2.- Inyección de morteros de cemento.	99
4.2.3.3.- Reparación de grietas con rajuelas.	102
4.2.4.- Inserción de barras de refuerzo.	102
4.2.5.- Encamisado de muros.	106
4.2.5.1.- Encamisado con mallas metálicas.	106
4.2.5.1.1.- Pruebas a muros de mampostería con aberturas y rehabilitación con malla y mortero.	107
4.2.5.2.- Técnicas habituales de rehabilitación.	114

Capítulo 5.- Metodología, análisis e interpretación de resultados.	
5.1.- Enfoque.	116
5.2.- Alcance.	117
5.3.- Tipo de diseño.	118
5.3.1.- Estudio transversal.	119
5.4.- Instrumentos de recopilación.	119
5.4.1.- Observación.	120
5.5.- Descripción del proceso de investigación.	121
5.6.- Análisis e interpretación de resultados.	121
Conclusiones.	123
Bibliografía.	125

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.

El desarrollo de la naturaleza humana se ha representado en construcciones grandiosas e impactantes promoviendo así, las diferentes culturas del mundo a través del tiempo; dichas construcciones causan fascinación entre las nuevas generaciones.

Es indudable que en la prehistoria el hombre empleó las artes constructivas no sólo con fines funcionales, sino también simbólicos. Prueba de ello son los numerosos restos de monumentos funerarios, cavernas artificiales o recintos conmemorativos.

La culturas primitivas utilizaron los productos de su entorno para sus construcciones e inventaron utensilios, técnicas de explotación y tecnologías constructivas para poderlos utilizar como materiales de edificación. “Su legado ha servido de base para desarrollar los modernos métodos industriales”.(Biblioteca Atrium de la Construcción,1998:37)

Durante el siglo XIX, la ingeniería acomete una gran cantidad de obras importantes, como puentes, diques y túneles. Para ello se hace imprescindible un avance científico en la edificación, como el cálculo de estructuras o la resistencia

de materiales, sin embargo, todavía no se tomaban en cuenta normativas pues fue hasta el año 1944 que surge el primer reglamento especializado en construcción de mampostería sin refuerzo.(Newman, Alexander,P.E.,2001:518)

Planteamiento del problema.

La mampostería es un material ampliamente utilizado para la construcción de viviendas en el mundo y en particular en Latinoamérica, incluyendo México.

No obstante, México es uno de los países con mayor actividad sísmica y volcánica pues se encuentra geográficamente en una zona con fallas tectónicas, como la de San Andrés, Placa de Cocos y de Rivera. Dichos fenómenos naturales, causan grandes estragos en la población, principalmente en la de escasos recursos, en éste caso los sismos, además de causar la muerte de muchas personas, generan pérdidas millonarias en la infraestructura básica del país y particularmente en la vivienda.

Por ello, es importante conocer y analizar el comportamiento estructural de edificaciones de mampostería ante los movimientos telúricos y sobre todo el restaurar estructuras existentes conservándolas el mayor tiempo, pero principalmente hacer un diseño basado en tales fenómenos dado que es menos costoso prevenir.

Objetivo.

Si se considera que México cuenta con zonas de elevada peligrosidad sísmica y que en la mayoría de las ocasiones los inmuebles no cuenta con un adecuado diseño estructural sujeto a fenómenos naturales como los sismos, resulta necesario que los inmuebles que se restauran tengan un adecuado análisis para que se revise la resistencia y de existir un inminente riesgo de colapso se refuercen y se pueda conservar el patrimonio durante más tiempo.

Con el fin de que las estructuras sean habitables y se disminuya el máximo el riesgo sísmico y si además se es posible hacer seguras ante sismo es una ventaja enorme, Entonces es preciso un correcto análisis de los posibles métodos de restauración después de que los elementos han sido dañados por sismo.

Objetivo general.

Conocer los métodos de evaluación estructural de mampostería dañada por sismo y estudiar cada una de las posibilidades de restauración teniendo en cuenta sus características para poder reforzar de la manera más adecuada los elementos dañados por sismo.

Pregunta de investigación.

La demanda de viviendas en México, sobre todo en las zonas conurbadas de algunas ciudades son sistemas constructivos de origen autóctono, con normativas raquíticas y sin diseño estructural que garantice su buen comportamiento ante movimientos telúricos. De tal modo que la incógnita a resolver mediante este trabajo de investigación es ¿Cuál es el comportamiento de las estructuras de mampostería ante un movimiento sísmico y cuál sería el método adecuado para la rehabilitación de viviendas?, ello con el fin de prevenir pérdidas humanas y materiales.

Justificación.

En México aún se utiliza como material de mampostería el tabique de barro y el tabicón de concreto para la construcción de las viviendas con una margen de calidad mínima lo cual las hace susceptibles a los movimientos sísmicos, de tal manera es trascendental el conocer perfectamente el comportamiento de las estructuras de mampostería ante los sismos para poder tener una restauración adecuada y poder conservar la o las edificaciones.

Marco de referencia.

En la prehistoria el hombre empleó las artes constructivas no sólo con fines funcionales, sino también simbólicos. Prueba de ello son los numerosos restos de monumentos funerarios, cavernas artificiales o recintos conmemorativos.

Las edificaciones de mampostería hechas en México sobre todo las más antiguas, son muy vulnerables a los movimientos sísmicos ya que México se encuentra en una zona con fallas tectónicas. Por lo cual es de suma importancia dar a conocer de manera clara y concisa el análisis y la restauración de las construcciones de mampostería y poder ayudar al consultante.

En la antigüedad se intentaba evitar los efectos de los sismos en las construcciones; fue a partir del siglo XVIII, después de que algunos terremotos destruyeran barrios enteros de algunas ciudades europeas, cuando la cuestión de una técnica de edificación específicamente orientada a limitar los daños de los terremotos comenzó a ser considerada desde un punto de vista sistemático.

“En las regiones con mayor riesgo de que se produzcan terremotos, las edificaciones siguen unas normas impuesta, conjuntamente la tecnología moderna ofrece soluciones cada día más sofisticadas, en paralelo a los progresos de la ingeniería”.(Microsoft, Encarta,2009.)

Dado que el uso de la mampostería en México tiene una fuerte aceptación para aplicaciones diversas pero principalmente con fines estructurales en la vivienda, es importante conocer la evaluación y los métodos de restauración de las edificaciones de mampostería ante la presencia de un sismo.

CAPÍTULO 1

LA MAMPOSTERÍA

En esta parte se toma en cuenta la definición de la mampostería, los requisitos de las piezas respecto a las NTC y qué tipo de refuerzos debe de llevar.

1.1.- Materiales más usados en la mampostería.

El término de mampostería se refiere al sistema de construcción tradicional conformada por dos componentes importantes, las piezas o mampuestos y la mezcla para su unión.

A través de la historia se ha empleado una gran variedad de aparejos, dependiendo del tipo, tamaño y cualidades ornamentales de los mampuestos son así mismo colocados en la construcción de muros y paredes. Todos ellos, tienen una misma finalidad el de evitar las juntas verticales continuas, impidiendo el reparto de las cargas de tal manera coadyuvando a la aparición de peligrosas fisuras verticales (Fig.1.1)



Figura 1.1. Distintos aparejos de mampostería (Enciclopedia Encarta, 2009).

Desde tiempos primitivos, se han usado diversos materiales para conformar las piezas de la mampostería, los más comunes son:

- “Las rocas *naturales* debido a su abundancia son empleadas en muchas de las construcciones. Se clasifican en rocas ígneas (resinto, granito, tezontle, cantera, chiluca, etc.), sedimentarias (tepetate) y metamórficas (mármol)”.(Nuñez Ricargo ;2000:26) Es un elemento que puede tener una resistencia muy elevada, como el caso del mármol y el granito, estéticamente son espectaculares y tienen además propiedades acústicas y térmicas.

- *Adobes*, que tienen características no sólo estructurales sino además térmicas. Su facilidad de elaboración lo ha hecho un material de gran uso aun en nuestros días.

- *Tabique o ladrillos*, estos han tenido una enorme evolución a lo largo del tiempo, su proceso constructivo ha mejorado colosalmente en las últimas décadas, el implemento los tabiques extruidos ha hecho que se vuelvan aun más versátiles y ligeros.

- “*Bloques y tabicones de concreto*, es uno de los materiales más comúnmente empleados a últimas fechas dado su bajo costo debido a la elaboración en serie. Se elabora a base de cemento Pórtland y arena. Su calidad depende de los materiales de elaboración y tiene tantos diseños y

tamaños como se requiera. Pueden ser macizos o huecos y sus dimensiones por lo general son mayores a los tabiques”.(Ortiz y otros, 2005:10)

Por otro lado, el material aglutinante para la unión de las piezas juega un papel importante para la resistencia de los elementos de la mampostería. Este material es conocido como *mortero* y de igual forma se ha desarrollado conforme al tiempo. Los primeros morteros fueron hechos a base de arcillas, posteriormente se empleó la puzolana y actualmente el cemento Pórtland que da una mayor resistencia.

La mampostería es un elemento que tiene capacidad estructural, además es decorativo, acústico y térmico lo que lo hace un elemento en la construcción muy solicitado (Fig1.2).



Fig.1.2.- Enciclopedia Encarta. Adam Woolfitt/Corbis

1.2.- Requisitos de los materiales para mampostería.

Para garantizar una resistencia adecuada y un buen comportamiento de las estructuras de mampostería, es necesario que los materiales empleados para su construcción cumplan con ciertas características. Por esta razón los diferentes códigos de diseño establecen una serie de requisitos para avalar la calidad de las piezas, del mortero y del acero de refuerzo.

Uno de los códigos de diseño, más completos y confiables en México es el reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, el cual, mediante Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructura de Mampostería (NTC-Mampostería) establece los siguientes requisitos:

1.2.1.- Tipos de piezas.

Las piezas usadas en los elementos estructurales de mampostería deberán cumplir con la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE, con excepción de lo dispuesto para el límite inferior del área neta de piezas huecas. El peso volumétrico neto mínimo de las piezas, en estado seco, será el indicado en la tabla 1.1

Tabla 1.1 Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco.

Tipo de pieza	Valores en kg/m ³ (kN/m ³)
Tabique de barro recocido	1300 (13)
Tabique de barro con huecos verticales	1700 (17)
Bloque de concreto	1700 (17)
Tabique de concreto (tabicón)	1500 (15)

1.2.2.- Piezas macizas.

Se considerarán como piezas macizas aquellas que tienen en su sección transversal más desfavorable un área neta de por lo menos 75 por ciento del área bruta, y cuyas paredes exteriores no tienen espesores menores de 20 mm, para la aplicación de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

1.2.3.- Piezas huecas.

Las piezas huecas son las que tienen, en su sección transversal más desfavorable, un área neta de por lo menos 50 por ciento del área bruta; además el espesor de sus paredes exteriores no es menor que 15 mm. Para piezas huecas con dos hasta cuatro celdas, el espesor mínimo de las paredes interiores deberá ser de 13 mm. Para piezas multiperforadas y cuyas perforaciones sean de las mismas dimensiones, y cuya distribución sea

uniforme, el espesor mínimo de las paredes interiores será de 7 mm. Se entiende como piezas multiperforadas aquéllas con más de siete perforaciones o alvéolos (Fig. 1.3).

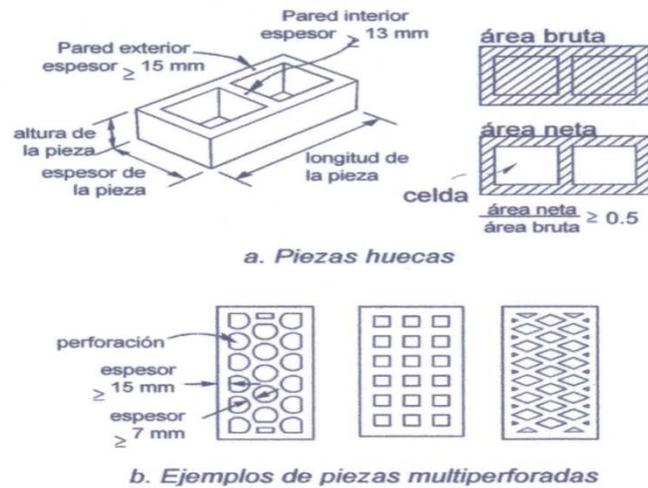


Fig. 1.3. Ejemplos de piezas huecas

1.2.4.- Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión se determina para cada tipo de piezas de acuerdo con el ensaye especificado en la norma NMX-C-036. Para diseño, se empleará un valor de la resistencia, f_p^* , medida sobre el área bruta, que se determinará como el que es alcanzado por lo menos por el 98 por ciento de las piezas producidas.

La resistencia de diseño se determina en base a la información estadística existente sobre el producto o a partir de muestreos de la pieza, ya sea en planta o en obra. Si se prefiere por el muestreo, se toma por al menos tres muestras, cada una de diez piezas, de lotes diferentes de la producción.

Las 30 piezas obtenidas se ensayan en laboratorios acreditados por la entidad de acreditación reconocida en términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. La resistencia de diseño se calculará como:

$$f_p^* = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.5 c_p}$$

donde:

$\overline{f_p}$ media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta

c_p coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

1.2.5.- Mortero para pegar piezas.

Los morteros que empleados en elementos estructurales de mampostería deberán cumplir con los requisitos siguientes:

- Su resistencia a compresión será por lo menos de 40 kg/cm² (4 MPa).
- Siempre deberán contener cemento en la cantidad mínima indicada en la tabla 1.2.
- La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 3. El volumen de arena se medirá en estado suelto.
- Se empleará la mínima cantidad de agua que dé como resultado un mortero fácilmente trabajable.

Si el mortero incluye cemento de albañilería, la cantidad máxima de éste, a usar en combinación con cemento, será la indicada en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Proporcionamientos, en volumen, recomendados para mortero en Elementos estructurales.

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena ¹	Resistencia nominal en compresión, f_f^* , kg/cm ² (MPa)
I	1	—	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen.	125 (12.5)
II	1	0 a ½	—		75 (7.5)
III	1	½ a 1	—		40 (4)
	1	—	½ a 1¼		

¹ El volumen de arena se medirá en estado suelto.

1.3.- Acero de refuerzo.

El refuerzo que se emplee en castillos, dalas, elementos colocados en el interior del muro y/o en el exterior del muro, estará constituido por barras corrugadas, por malla de acero, por alambres corrugados laminados en frío, o por armaduras soldadas por resistencia eléctrica de alambre de acero para castillos y dalas, que cumplan con las Normas Mexicanas correspondientes. Se admitirá el uso de barras lisas, como el alambrón, únicamente en estribos, en mallas de alambre soldado o en conectores. El diámetro mínimo del alambrón para ser usado en estribos es de 5.5 mm. Se podrán utilizar otros tipos de

acero siempre y cuando se demuestre a satisfacción de la Administración su eficiencia como refuerzo estructural.

El módulo de elasticidad del acero de refuerzo ordinario, E_s , se supondrá igual a 2×10^6 kg/cm² (2×10^5 MPa). Para diseño se considerará el esfuerzo de fluencia mínimo, f_y , establecido en las Normas citadas.

CAPÍTULO 2

EFFECTOS DE LOS SISMOS EN LAS CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA

En este capítulo se definirá lo que es un sismo y cuáles son los daños provocados en las diversas construcciones de mampostería.

2.1.- Origen de los sismos.

Los sismos o terremotos se producen cuando la corteza de la Tierra se desplaza repentinamente a lo largo de una falla. Las rocas son sometidas a una gran presión se rompen y liberan energía en forma de ondas sísmicas. La mayoría de los sismos que se presentan en todo el mundo son de baja magnitud lo cual no son percibidos por los seres humanos, ya que, son vibraciones similares a las creadas por el paso de un camión pesado. Por ende los sismos son resultado de cambios naturales y tectónicos, como tales no son catastróficos. “Lo que hace que los sismos tengan una mala imagen es que las vibraciones de gran magnitud destruyen asentamientos urbanos, en los que las construcciones se derrumban debido a las fuerzas generadas por este fenómeno”. ([Http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap](http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap)).

2.2.- Estudio de los sismos.

El origen de los sismos ha sido una preocupación constante entre las personas que viven en zonas de riesgo desde tiempos remotos. Algunos de los antiguos filósofos griegos atribuían los sismos a vientos subterráneos; otros a fuegos existentes en las profundidades de la Tierra. Alrededor del año 130, el sabio chino Chang Heng expuso el primer sismógrafo, una teoría según la cual las ondas deberían recorrer la Tierra desde el foco (hipocentro) del terremoto. El sismólogo ruso príncipe Boris Golitzyn inventó el sismógrafo moderno a principios del siglo XX. Este instrumento, que empleaba un péndulo magnético suspendido entre los polos de un electroimán, fue el primer paso en la era moderna de investigación sísmica.

En el proceso de un sismo se producen en el interior de la tierra ondas sísmicas como las ondas P (compresión) y ondas S (cortante) las cuales, al llegar a la superficie dan origen a las ondas Love y ondas Rayleigh, llamadas así en honor a sus descubridores. Estas ondas son detectadas por los sismógrafos registrando la aceleración en función del tiempo y características como localización del epicentro, magnitudes de las aceleraciones a cualquier tiempo, los valores de los periodos característicos del terreno, la duración y magnitud del evento sísmico.

En México los sismos de gran magnitud ocurren en su mayoría en la zona de subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica. La

línea donde comienza la subducción se encuentra entre Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán., por lo que allí es donde se localizan la mayor parte de los epicentros. Dado lo anterior, México cuenta con un riesgo sísmico de moderado a muy alto lo que hace que las construcciones lleguen a tener fallas ocasionadas por este fenómeno.

2.3.- Desempeño sísmico observado de edificaciones de mampostería.

El sismo de 1985 en México, produjo la revisión y adecuación de la normatividad vigente en factor de seguridad estructural. Asimismo, se modificaron y adecuaron algunos de los factores que influyeron en el nivel de resistencia observado, tales como factores de reducción de resistencia; las propiedades mecánicas de los materiales y el control calidad del sistema constructivo.

Los daños observados en muros de mampostería se debieron al deterioro de materiales débiles (adobe y mampostería sin refuerzo), al intemperismo y filtraciones y a hundimientos diferenciales (Instituto de ingeniería, 1992). Por ello no se realizaron cambios radicales en las especificaciones para estructuras de mampostería, solo se reorganizó su formato simplificando los métodos y ajustando los valores de daño en los materiales.

A continuación se mencionarán algunos comportamientos observados después de los eventos sísmicos más importantes ocurridos en México, prevaleciendo los modos de falla más comunes y las casusas posibles que los originaron, tomando en cuenta los siguientes tipos de edificaciones de

mampostería: de adobe, sin refuerzo, confinada, con refuerzo interior, muros diafragma y elementos no estructurales (divisorios o de relleno).

2.3.1.- Edificaciones de adobe.

El desempeño de las edificaciones construidas con adobe, habitualmente es malo ante vibraciones moderadas o intensas. No obstante, este tipo de mampostería para vivienda unifamiliar de uno o incluso de dos niveles se sigue utilizando en las áreas rurales en zonas de alta sismicidad del país, pues se lleva a cabo por *autoconstrucción*.

Después de los sismos de 1995 y 1997 en Guerrero y Michoacán respectivamente, se observó que las edificaciones construidas con adobe son las más afectadas durante un sismo, puesto que la mayoría de las construcciones tenían un agrietamiento vertical en los muros transversales (Fig. 2.1), ocasionado por contar con una viga de madera en sentido longitudinal.

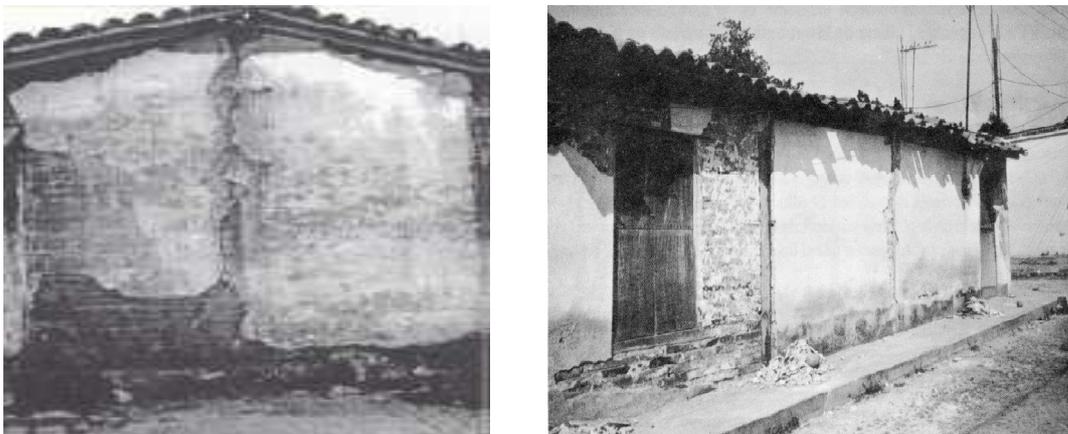


Figura 2.1.- Falla por flexión fuera del plan (Sordo y otros, 1996)

También se presentó el agrietamiento vertical en las esquinas de las viviendas y en la unión de los muros perpendiculares (Fig.2.2), dichos agrietamientos son causados por la tendencia al volteo de los muros y la debilidad en la resistencia a tensión de las piezas.



Figura 2.2.- Agrietamiento vertical en esquinas (Juárez y otros, 2000)

Otros daños observados son: la concentración de grietas en las aberturas por falta de elementos de cierre en las puertas y ventanas, el colapso de la parte central en muros largos, el agrietamiento inclinado en muros y la caída del sistema del techo (Fig.2.3)



Figura 2.3 Daño en aberturas por falta de confinamiento (López y Teshigawara, 1997)

En resumen, según Flores y otros, 2001, los daños en las viviendas de adobe se atribuyen principalmente a las siguientes causas:

- Baja capacidad a tensión de las piezas de adobe causada por la poca calidad de los materiales.
- No existe confinamiento perimetral en los muros, igualmente en las aberturas (puertas y ventanas) de los mismos.
- Imperfecta liga entre esquinas de los muros transversales, aún con el traslape de piezas.
- Falta de mantenimiento adecuado, puesto que las vigas del techo estaban en mal estado o los muros deteriorados por la intemperie.

Las características estructurales de la vivienda típica de adobe tales como que su masa está distribuida en los muros, el no existir una liga eficiente entre los muros así como un diafragma rígido, hacen que su comportamiento sísmico no sea más deficiente que el de las estructuras de mampostería modernas.

2.3.2.- Edificaciones de mampostería sin refuerzo.

Esta técnica de construcción se realiza con piezas macizas de tipo artesanal. Es muy popular en zonas rurales y urbanas principalmente en construcciones antiguas.

Las principales causas de su mal comportamiento ante un sismo, se debe a las carencias en la configuración estructural. Un ejemplo de ello son las construcciones que dependen de muros de carga sin refuerzo que se amplían con pisos superiores, tomando una incorrecta unión entre los elementos existentes y los nuevos, realizándose a un traslape o anclaje del refuerzo longitudinal de los castillos impropio. Otra carencia es el uso de polines de madera como elementos de confinamiento o bien el uso de castillos de concreto sin ligamiento al muro de mampostería (Fig.2.4).

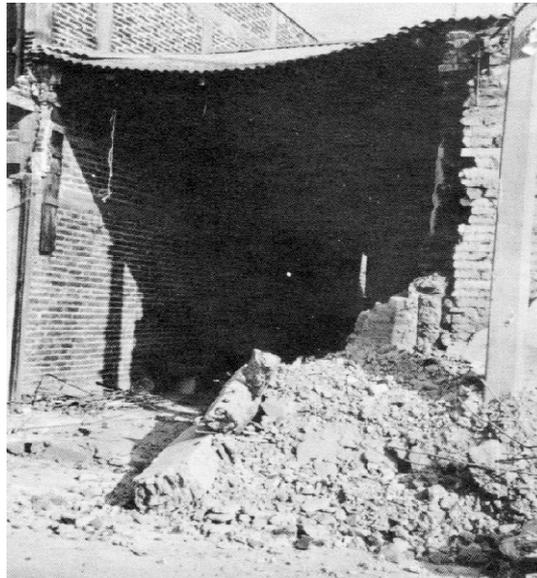


Figura 2.4.- Inadecuada conexión de muros de mampostería con elementos Confinantes (López y Teshigawara, 1997)

Por lo anterior, se ha considerado que las estructuras de mampostería sin refuerzo conllevan a esquemas de agrietamiento, como a continuación se mencionan:

- Agrietamiento inclinado, ocasionando por esfuerzos de tensión diagonal en las piezas.
- Agrietamiento en forma de escalera siguiendo la junta de mortero, originado por esfuerzo de corte.
- Agrietamiento vertical en las esquinas y el centro; originado por la flexión fuera del plano del muro y volteo de la estructura.
- Agrietamiento en forma de placa perimetralmente apoyada, ocasionado por los esfuerzos de corte y volteo de la estructura.

2.3.3.- Edificaciones de mampostería confinada.

Este tipo de construcción es a base de muros de carga hechos de piezas macizas o huecas, de barro recocido o concreto, confinados por elementos livianos de concreto reforzado (dadas y castillos).

Este tipo de edificaciones construidas conforme al reglamento vigente de México han tenido un desempeño satisfactorio durante los sismos recientes. No obstante su vulnerabilidad ha sido mayor en las regiones de alta sismicidad. (Meli, 1990).

El daño más severo está asociado a una baja densidad de muros, la cual tiende a disminuir conforme aumenta la cantidad de muros. El daño intermedio se relaciona a las edificaciones con altas densidades de muros, debido a la

presencia de hundimientos diferenciales en combinación con las acciones sísmicas.

Los daños que se han presentado en estructuras de mampostería confinada, sobre todo en las colonias populares localizadas en zonas sísmicas, son por la existencia de grandes aberturas en los muros, ausencia de elementos resistentes en la planta baja, distribución irregular de muros tanto en planta como en elevación y separación inadecuada entre construcciones vecinas.

La ausencia de una cierta cantidad de muros en la planta baja, ocasiona un mecanismo de *piso suave* en algunas de las viviendas de uno o dos niveles (Fig.2.5).



Figura 2.5.- Colapso debido a la escasez de muros en planta baja (López y Teshigawara, 1997)

Otra causa es el fenómeno de *licuación*, es decir deformación excesiva de la arena sobre la que se cimentaron. Éste fenómeno ocasiona el

asentamiento de las construcciones y el levantamiento del piso de concreto sin ningún tipo de refuerzo, además hay daño en los muros de mampostería (Fig.2.6) (López y Teshigawara, 199; Alcocer y Tena-Colunga, 1997).



Figura 2.6.- Asentamiento de debido al fenómeno de licuación de arenas (López y Teshigawara, 1997)

2.3.4.- Edificaciones de mampostería con refuerzo interior.

El empleo de este sistema es menor a los antes mencionados, ya que los muros son construidos con piezas huecas reforzados interiormente con barras de diámetro pequeño o alambres de acero de alta resistencia, colocadas en celdas y en la junta horizontal del mortero. Las dificultades constructivas que presenta este sistema, aunadas a la falta de control de calidad y sobre todo la costumbre de utilizar mampostería confinada han limitado el uso de la mampostería con refuerzo interior en edificaciones para uso habitacional (Fig. 2.7).

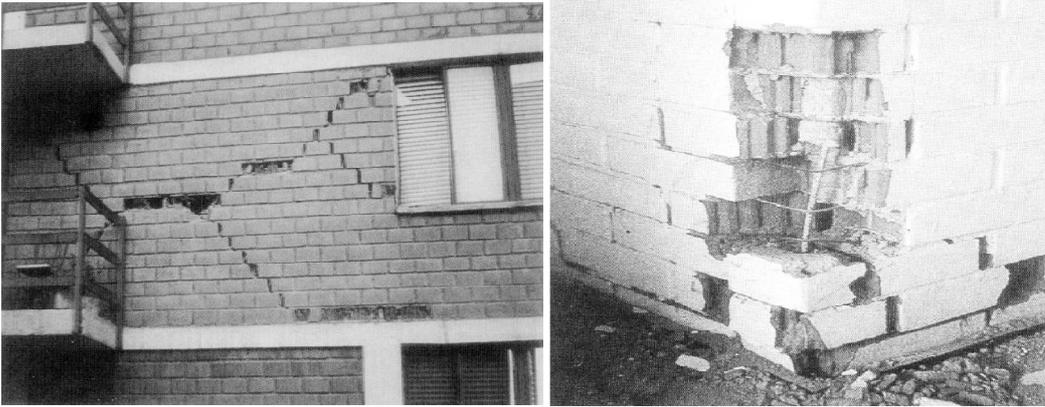


Figura 2.7.- Detalle de piezas huecas con refuerzo interior.

En México, el desempeño de las edificaciones de mampostería con refuerzo interior ante un sismo no ha sido el adecuado, puesto que como anteriormente se menciona existe una falta de supervisión durante el proceso de construcción, dado que el refuerzo no se colocó en la cantidad y posición adecuada (Meli, 1990).

Otra de las desventajas de este proceso constructivo son las siguientes:

- Fallas locales de las piezas huecas por el desplazamiento de sus paredes.
- El anclaje del refuerzo interior en los elementos exteriores no es el adecuado (Fig. 2.8).
- Necesidad de altas cantidades de refuerzo interior para asegurar un buen comportamiento de la edificación.



a)



b)

**Figura 2.8.- a) Daño en muros de mampostería con refuerzo interior (Shultz, 1994);
b) Fallas en muros de mampostería con refuerzo interior deficiente (Alcocer y otros, 1999).**

Sin embargo, en otros países como Japón y Estados Unidos se ha difundido el uso de la mampostería reforzada interiormente, en viviendas multifamiliares, ya que el método constructivo consiste en llenar completamente los huecos de todas las piezas, utilizando un mortero con elevada fluidez y se refuerza con elevadas cuantías de acero horizontal y vertical, formando un muro monolítico ayudando así al incremento en la resistencia ante cargas

laterales y en la capacidad de desplazamiento lateral con respecto a la mampostería sin refuerzo interior o confinada.

2.3.5.- Muros diafragma.

Son muros de mampostería que se utilizan como relleno, parcial o total, en las crujías de marcos de concreto reforzado o de acero. En algunas regiones del país se les conoce también como *muros tapón*. Comúnmente estos muros son construidos con ladrillos de tipo artesanal o bloques de concreto. “Es habitual que estos tipos de muros se consideren como elementos no estructurales por no participar en el modelo numérico de la estructura. Sin embargo, si no son desligados del marco principal, incrementan la rigidez lateral de los marcos y por siguiente, modifican la distribución de fuerzas entre los elementos resistentes y las propiedades dinámicas de toda la estructura” (Terán- Gilmore y Bertero, 1992; Fundación ICA, 1988).

Entre los daños que se producen por el empleo de este tipo de muros está el conocido como *columna corta*. Se presenta cuando el muro de mampostería llena parcialmente la altura de la crujía del marco, causando que la columna quede sujeta a una fuerza cortante mayor a la considerada en su diseño debido a la rigidez proporcionada por el muro (Fig.2.9).

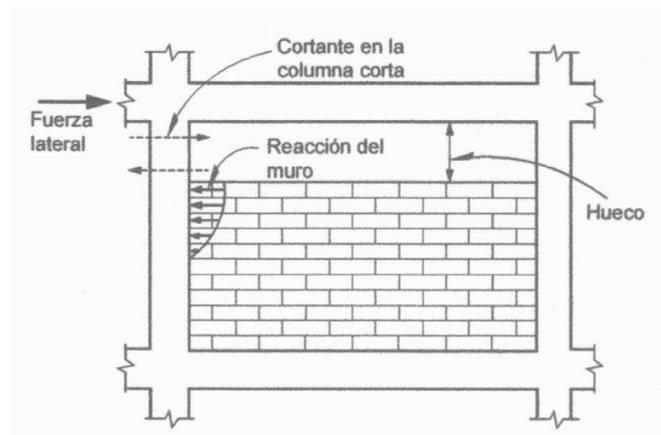


Figura 2.9.- Efecto de columna corta en muro diafragma de altura Incompleta. (Instituto de Ingeniería, 1992)

Quando se emplean muros de diafragma en los marcos colindantes y no se consideran como estructurales, inducen excentricidades grandes en planta e importantes efectos de torsión. Este fenómeno explica la gran cantidad de edificios en esquina que resultan afectados durante los sismos (Fundación ICA, 1988).

Así mismo, el uso de muros diafragma como pretilas en marcos de fachada es frecuente, ocasionando una discontinuidad de rigidez en elevación, o bien, la ausencia de los mismos en la planta baja donde se puede presentar el mecanismo de piso suave. Para evitar este tipo de fallas, se sugiere desligar estos elementos del marco principal, mediante el uso de materiales flexibles entre el marco y el muro, para evitar la concentración de esfuerzos en las esquinas.

Por último cabe señalar que el desligue de los muros necesita una buena supervisión durante la construcción, además de que el diseñador debe establecer la participación de este tipo de muros, si es estructural o no estructural, disponer del detallado adecuado y revisar su ejecución durante el proceso constructivo para evitar un mal comportamiento general de la estructura.

2.3.6.- Estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería existentes.

En los sismos pasados se observó que el desempeño de algunas edificaciones de mampostería fue satisfactorio por considerar los criterios ingenieriles, tales como una adecuada cantidad de muros, confinamiento en muros, puertas y ventanas mediante dadas y castillos, así como una eficiente configuración estructural.

Por el contrario, ha sido notorio el daño en las edificaciones de mampostería sin refuerzo o las construidas con piezas de adobe, las cuales desafortunadamente, representan los procedimientos constructivos más empleados en numerosas comunidades rurales cercanas a las zonas sísmicas de México.

Recientemente, se han desarrollado estudios para estimar la capacidad ante cargas laterales, del tipo sísmico, a viviendas de algunas ciudades, como

Chilpancingo, Guadalajara, Toluca y la Ciudad de México, con el fin de evaluar su vulnerabilidad. Por ejemplo, se evaluó una muestra de 229 edificaciones de hasta cinco niveles principalmente de mampostería confinada, las cuales fueron construidas de acuerdo al reglamento de 1976. (Guerrero y otros, 1996).

En este estudio se determinó el *coeficiente de resistencia* (i.e. cociente del coeficiente sísmico y el factor de comportamiento sísmico; c/Q) asociado a la falla para cada una de las construcciones, suponiendo que esta ocurre cuando la fuerza cortante actuante y la resistente se igualan. De esta manera, la fuerza cortante resistente se calculó como la suma de las resistencias a cortante de cada muro en la misma dirección, de acuerdo con su rigidez. La fuerza cortante actuante se determinó mediante un análisis estático, empleando un coeficiente sísmico de 0.32. Concluyendo el estudio se obtuvo como resultado que las edificaciones tienen un *coeficiente de resistencia* inferior al estipulado en la normatividad vigente ($c/Q = 0.16$) y de 1976 ($c/Q = 0.11$), correspondiente al año de construcción de las edificaciones. Inclusive, cerca del 25% de la muestra sólo alcanzan el 50% (0.08) del *coeficiente de resistencia* estipulado en el reglamento actual.

Después de la investigación iniciaron los trabajos de reforzamiento en las edificaciones de mampostería para aumentar el nivel de seguridad estructural, consistentes en la adición de malla de alambre soldado recubierta con mortero de cemento en las paredes exteriores de los muros perimetrales, en todos los niveles.

El anterior estudio conlleva a seguir evaluando la capacidad de las edificaciones de mampostería existentes y en caso de ser necesario, elevar su nivel de seguridad estructural.

2.4.- Aspectos a considerar en el diseño de estructuras de mampostería en zonas sísmicas.

2.4.1.- Normatividad.

En materia de seguridad estructural algunos de los estados de la República Mexicana no cuentan con normas técnicas adecuadas para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, basándose en las vigentes del Distrito Federal. Sin embargo, esto no es lo más adecuado, pues las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en cada región, en específico de los morteros y piezas, macizas o huecas, empleadas en la construcción son diferentes, además de que el comportamiento de las edificaciones de mampostería ante un sismo es diferente a las que se encuentran en el Distrito Federal.

Se debe reconocer que en las zonas rurales todavía se realiza la *autoconstrucción*, utilizándose el adobe y la mampostería sin refuerzo como materiales básicos. Por ende, es necesaria la orientación de la población respecto a los métodos tanto de construcción como de reforzamiento de este tipo de viviendas mediante guías prácticas y de distribución fácil.

2.4.2.- Calidad de los materiales.

Como se menciona anteriormente, las propiedades mecánicas tanto de las piezas de mampostería como la calidad de mortero, son diferentes en cada región del país. Por ello es necesario realizar ensayos para determinar los valores de diseño en vez de considerar las establecidas en las normas vigentes del Distrito Federal. Además, es importante tomar atención en las propiedades índice de las piezas huecas del tipo industrializado dado el incremento de la oferta en el mercado.

2.4.3.- Influencia de las aberturas en muros de mampostería.

2.4.3.1.- Influencia de las aberturas en la rigidez lateral de la estructura.

Obviamente, por requerimientos de tipo arquitectónico y adecuado funcionamiento, las viviendas construidas de mampostería tienen aberturas en los muros, las más comunes son la presencia de puertas y ventanas. Indiscutiblemente, el comportamiento de una vivienda de mampostería con aberturas en sus muros es diferente al de una vivienda que en sus muros no tienen aberturas, por lo cual es importante que el ingeniero responsable del diseño y construcción de este tipo de viviendas, sepa ponderar el efecto de las aberturas en el comportamiento de los muros y de la vivienda.

En la figura 2.10 se muestra la influencia de las aberturas en el modo de falla global de una construcción.

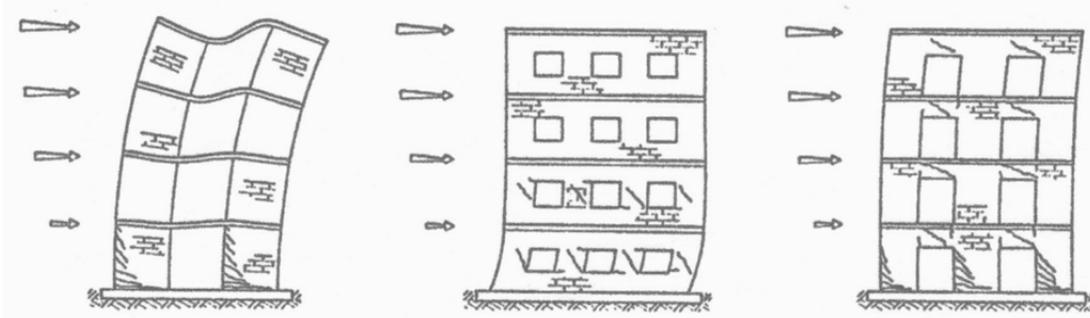


Figura 2.10.- Influencia de las aberturas en el modo de falla de la mampostería (Tomažević, 1977).

El efecto de las aberturas en los muros es la disminución de su rigidez lateral. Es decir, una vivienda que en sus muros tiene aberturas tendrá mayores desplazamientos laterales que una vivienda que no tiene aberturas en sus muros. En la figura 2.11 se muestra una vivienda de mampostería de dos niveles con aberturas sujeta a un cortante V aplicado en la parte superior de la estructura.

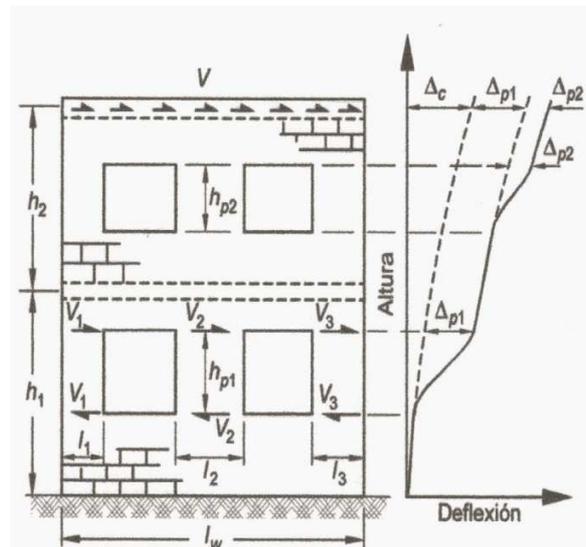


Figura 2.11.- Deformaciones debidas a fuerzas laterales en una estructura de mampostería con aberturas (Paulay y Priestley, 1992).

En esta estructura el desplazamiento lateral se muestra en forma gráfica en la parte derecha de la figura, en que en la línea sólida se muestra el desplazamiento total. El desplazamiento total se conforma por un desplazamiento Δ_c del muro sin aberturas más las deflexiones adicionales producidas en los muretes (mampostería entre aberturas), Δp_1 y Δp_2 de los niveles 1 y 2, respectivamente ((Paulay y Priestley, 1992).

2.4.3.2.- Influencia de las aberturas en la distribución de fuerzas cortantes.

Las aberturas en los muros de mampostería repercuten en la reducción del área transversal utilizable para resistir fuerzas horizontales, por lo tanto se incrementa los esfuerzos cortantes en los muretes, de tal manera se debe de determinar la fuerza actuante en cada murete, estableciendo si tienen o no resistencia suficiente con la sección propuesta. En la práctica se supone que el cortante que debe resistir cada murete es proporcional a su área transversal, pero tomando en cuenta que dicha distribución de fuerzas despreja las deformaciones por flexión.

Dado que en muchas edificaciones el ancho de estos muretes es igual o menor a su altura, las deformaciones por flexión en los muretes no es despreciable y esto hace que la contribución de las deformaciones de flexión provoque variaciones en la rigidez lateral y en la distribución de fuerzas laterales que debe resistir cada murete. Para obtener una mejor aproximación de las fuerzas cortantes en cada murete se toma en cuenta la siguiente expresión:

$$V_i = \frac{k_i}{\sum_1^3 k_i}$$

donde:

k_i es la rigidez lateral de cada murete considerando tanto deformaciones de corte como deformaciones de flexión.

Las aberturas provocan un incremento en el esfuerzo cortante actuante, no uniforme, en las zonas cercanas a las aberturas. Además, es importante suministrar de dadas y castillos en la periferia de puertas y ventanas ya que es donde se concentran los esfuerzos de tensión. Desafortunadamente la práctica de utilizar confinamiento en nuestro país es poco usual, de ahí que se observen con frecuencia agrietamientos por tensión diagonal originados en las esquinas de las aberturas, aun en grandes proyectos habitacionales de interés social.

2.4.4.- Importancia de la configuración estructural.

La configuración estructural es primordial en el desempeño de las edificaciones de mampostería. A continuación se mencionan algunos aspectos importantes que ayudan a mejorar el desempeño sísmico de este tipo de edificaciones desde su proyecto inicial.

Densidad de muros: El desempeño satisfactorio en las edificaciones de mampostería de la ciudad de México se atribuye al uso del *método simplificado de análisis*, el cual proporciona una adecuada distribución y densidad de

muros. Dicho método se puede aplicar a estructuras con una altura límite, plantas simétricas y de buena rigidez torsional, con regularidad en elevación, así como garantizar la acción de diafragma rígido del sistema de piso (Meli, México, 1990). El seguir éste procedimiento conlleva a disposiciones sísmicamente aptas y adecuada resistencia para evitar el colapso de la construcción. La densidad de muros adecuada en una edificación debe ser mayor a medida en que la zona se tenga una alta sismicidad, como en estado de Guerrero (Fig. 2.12).

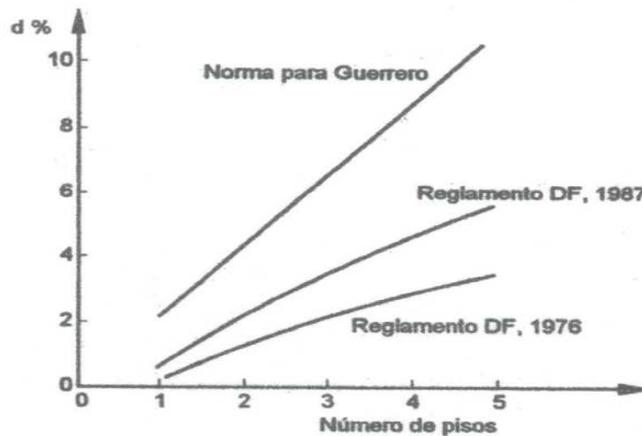


Figura 2.12.- Densidad de muros requerida por las normas de Guerrero y el Distrito Federal para edificios típicos (Meli, México,1990).

El uso del método simplificado asegura que la construcción tenga una resistencia lateral suficiente con un buen comportamiento en sismos intensos. De tal manera que se debe tomar en cuenta que la densidad de los muros sea suficiente para ambas direcciones, ya que a veces por vista arquitectónica se

descuida éste aspecto regularmente en dirección de la fachada en la construcción.

Configuración en planta: Las plantas deben ser sencillas, y no plantas alargadas, esto para que el movimiento de un extremo sea diferente al otro extremo. Debe existir simetría en planta, evitando las formas de L,T,C, o triangulares, con el fin de reducir los efectos de torsión (Fig. 2.13). Algunas formas simétricas, como en cruz o en H, como resultado de complementos o entradas también pueden tener efectos de torsión, incrementando las fuerzas cortantes y las deformaciones que actúan sobre cada muro durante el sismo.

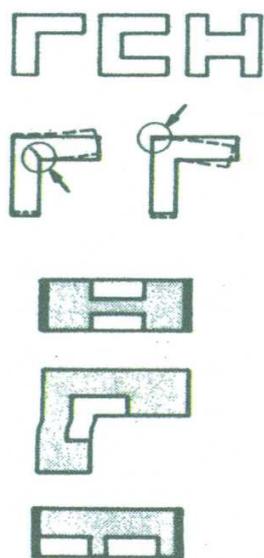


Figura 2.13.- Plantas irregulares en edificios de mampostería (Paulay y Priestley, 1992)

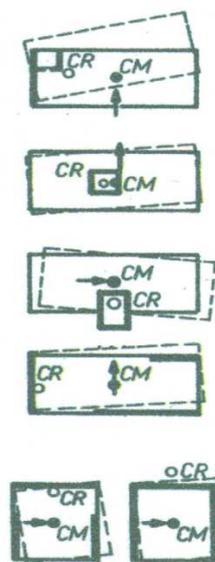


Figura 2.14.- Distribución asimétrica de muros en planta (Paulay y Priestley, 1992)

Distribución asimétrica de muros en planta: Una distribución asimétrica de muros lleva a problemas de torsión, incrementando las fuerzas cortantes y las deformaciones que actúan sobre cada muro durante un sísmico (Fig. 2.14). Pero a

veces por requisitos arquitectónicos, la distribución de muros en planta no son simétricos una o ambas direcciones, aún cumpliendo con una relación largo/ancho en planta apropiada.

Continuidad de todos los muros en elevación: Como anteriormente se mencionó, las discontinuidades llevan a la formación de mecanismos de *piso suave*. (Fig. 2.14). Por ello, se debe evitar la concentración o ausencia de muros en un solo nivel.

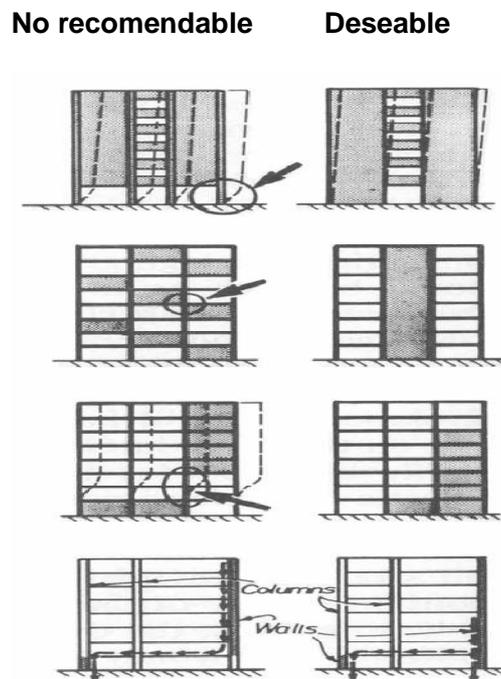


Figura 2.15.- Continuidad de muros en elevación. (Paulay y Priestley 1992)

Aberturas para puertas y ventanas: Con relación a las aberturas necesarias para puertas y ventanas se puede decir lo siguiente:

- Evitar la concentración de aberturas en una dirección ya que se reduce el área efectiva de muros que resisten las fuerzas laterales en esta dirección.

- Evitar aberturas muy cercanas entre sí ya que resultan muros esbeltos, con aspecto de H/L. Este hecho propicia a la disminución de la resistencia a flexión y cortante.
- Evitar columnas cortas, o bien, castillos cortos
- Colocar dadas y castillos en el contorno de todas las aberturas, proporcionando ductilidad a los muros y aunque no cambian propiamente la carga de agrietamiento diagonal, también participan en la resistencia a flexocompresión en el plano del muro.

Concentración de peso: En las construcciones de adobe o mampostería sin refuerzo especialmente, se debe evitar que el peso se concentre en el techo, ya que, se producen fuerzas inerciales que ocasionan la flexión fuera del plano de los muros ortogonales, o bien, el derrumbe de los muros por volteo.

2.5.- Detallado del refuerzo en zonas sísmicas.

Para mejorar el desempeño de las estructuras de mampostería reforzada, ya sea confinada o con refuerzo interior, se han hecho investigaciones de las cuales han surgido las siguientes aportaciones.

2.5.1.- Importancia de los castillos.

Los castillos proporcionan confinamiento a los muros de mampostería, pues su función es como un *zuncho*, que evita que los muros al agrietarse, queden

totalmente sueltos. Así mismo, los castillos ayudan a mantener la capacidad ante cargas laterales y aún después del agrietamiento inicial. Además, con una adecuada cantidad y distribución del esfuerzo permiten un aumento en la capacidad de deformación lateral de los muros y la disminución de rigidez y resistencia.

2.5.2.- Refuerzo transversal en castillos.

Según Alcocer (1997), dada la importancia de los castillos, se ha propuesto reforzar los extremos de los mismos con estribos a menor separación. Para zonas de alta sismicidad es recomendable usar estribos cerrados espaciados a cada hilada o a 0.5 veces d_c (la que resulte en menor separación) en una longitud, H_o , no menor que un sexto de su altura libre, 2 veces d_c , ni que 40 cm, donde d_c es el peralte del castillo. Esta recomendación se ha retomado en la propuesta de NTCM (del Distrito Federal) para el caso en que la resistencia de diseño a compresión diagonal de la mampostería, v_m^* , sea superior a 6 kg/cm².

En la misma norma se establece el uso de castillos interiores para considerar un muro como mampostería confinada. Dichos castillos deberán cumplir con las disposiciones existentes para los castillos tradicionales externos, en especial en la cuantía del refuerzo longitudinal y en el refuerzo transversal que estará formado por estribos *cerrados*.

Las excepciones en estos requisitos son la anchura del castillo interno, que obviamente será menor que t y la resistencia del mortero o concreto de relleno usado. En la figura 2.15 se ilustran estas disposiciones.

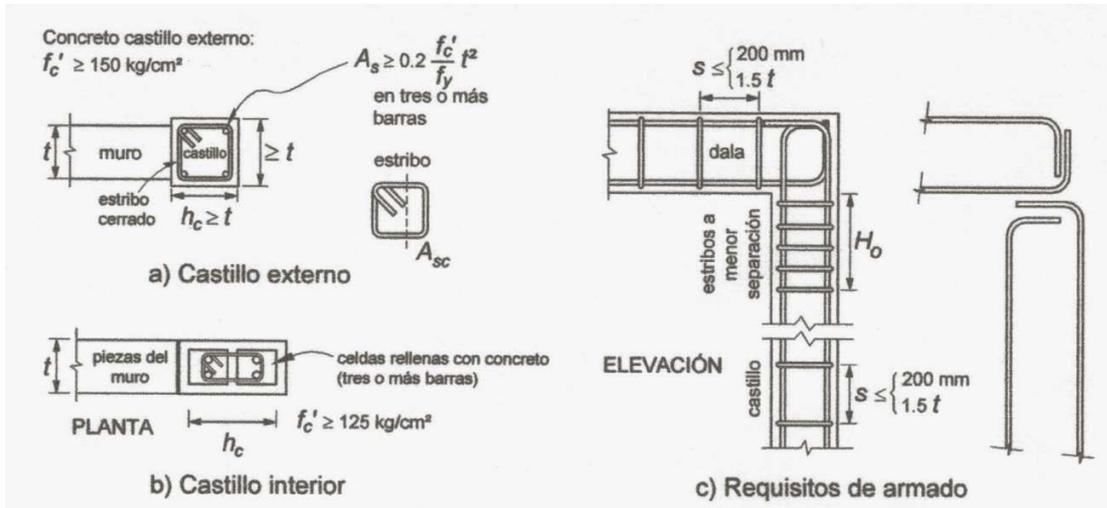


Figura 2.16.- Recomendaciones para el refuerzo transversal en castillos (NTCM, 2001).

2.5.3.- Refuerzo horizontal mediante alambres corrugados.

Para mejorar el comportamiento de los muros de mampostería confinada, ante cargas laterales, construidos con piezas macizas del tipo artesanal o multiperforadas del tipo prefabricado, se tiene como opción la adición de alambres corrugados laminados en frío grado 60 ($f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$) a lo largo de las juntas horizontales de mortero. Con este tipo de refuerzo en los muros de mampostería es viable incrementar la resistencia a cortante y la capacidad de deformación, ello demostrado con los experimentos, (Alcocer, 1997). Las NTCM han adquirido las

recomendaciones para la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia del muro.

Se aconseja tener cuidado en el anclaje de las barras con el castillo (Fig. 2.16), ya que de su eficacia depende el buen desempeño del muro. En Gobierno del Distrito Federal, (2002) se establece la cuantía mínima y máxima del refuerzo horizontal, en esta norma se prohíbe el uso de escalerillas de alambres lisos soldados a manera de refuerzo horizontal, pues de ser así, su comportamiento experimental ha demostrado que no existe una mejora significativa, principalmente por la falla prematura de los alambres en los puntos de soldadura.



Figura 2.17.- Anclaje de un alambre corrugado de 5/32" en el acero longitudinal de un castillo (Sánchez y otros, 1992)

2.5.4.- Refuerzo adicional mediante malla de alambre.

Otra disyuntiva para el aumento de la resistencia y la capacidad de deformación ante cargas laterales, es la de instalar malla de alambre soldado recubierta con mortero de cemento en la superficie de los muros de mampostería.

Su eficiencia ha sido evaluada experimentalmente, tanto para fines de reparación como refuerzo, con resultados alentadores (Ruiz, 1995; Alcocer y otros, 1996). Usualmente la resistencia que aporta la malla de alambre soldado ante cargas laterales depende de la cuantía y la eficiencia de los alambres horizontales, la calidad y densidad de los anclajes para ligar la malla al muro, la relación de aspecto H/L (donde H es la altura y L la longitud) de los muros, así como la calidad del recubrimiento. Así pues, se debe preferir a los muros cuadrados (relación H/L menor o igual a 1) respecto a los rectangulares durante un proceso de rehabilitación.

2.6.- Control de los desplazamientos laterales para limitar el daño estructural.

En el diseño, sísmico de estructuras de menos de 13m, como es el caso de las viviendas unifamiliares de mampostería confinada, sólo se requieren cumplir con un criterio de resistencia. Si se cumplen los requisitos de regularidad en planta y elevación, es posible aplicar el método simplificado descrito en la normatividad vigente para el diseño y construcción de estructuras de mampostería (Gobierno del Distrito Federal, 2002). Pese a lo anterior, algunas viviendas multifamiliares de mampostería confinada o con refuerzo interior se hallan en el límite del empleo del método simplificado y requieren de un análisis más específico en el cual se requiera revisar los desplazamientos de entrepiso de la estructura.

En la tabla 2.1 se relaciona el daño observado en especímenes de mampostería confinada sometidos a cargas cíclicas reversibles del tipo sísmico con 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 M. y Castrillón E., 1995). La distorsión de entrepiso se define como el cociente del desplazamiento lateral y la altura del entrepiso.

Tabla 2.1.- Grado de daño y deterioro de la propiedades estructurales en muros de mampostería confinada (Ruiz, 1995)

Estado de Daño Observado	Distorsión (%)	$R / R_{inicial}$	V / V_{max}	Grado de Daño 1
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.	0.42	0.13	0.99	Grave (V)

Desconchamiento del recubrimiento de concreto.				
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)

1 Clasificación de acuerdo a la tabla 6.5 de Rodríguez y Castrillón (1995)

De acuerdo con la tabla 2.1 (Ruiz J., 1995), para una distorsión de 0.60%, se espera que las estructuras de mampostería muestren un daño severo, o hasta el colapso, ante sismos intensos. Es frecuente que al limitar la distorsión máxima a 0.6%, se evada el daño a elementos no estructurales ligados a la estructura. Todo ello es resultado de que la reglamentación, hasta antes de Gobierno del Distrito Federal (2002), limitaba, con fines de seguridad estructural, la distorsión de entrepiso a 0.6% si había elementos no estructurales que pudieran sufrir daños, lo que normalmente se interpretaba como “estructuras con muros de mampostería”.

Sin embargo, “la evaluación analítica del comportamiento de edificaciones de mampostería confinada realizada durante el sismo de 1997 en el Estado de Michoacán evidenció que el estado de daño pudo estar relacionado a demandas de distorsión lateral, o demandas de deformación lateral del orden de 0.15%” (Rodríguez M., Alarcón P. y Machicao R.1997).

Puede evaluarse que el daño está asociado al deterioro de su capacidad ante cargas laterales y a una rápida degradación de su rigidez inicial, conforme aumenta el nivel de desplazamiento lateral. En particular, la degradación de rigidez es un parámetro muy importante, tanto en la evaluación de estructuras existentes como en el diseño de nuevas estructuras de mampostería.

En la Figura 2.18 se muestra la degradación de rigidez, en función del nivel de distorsión obtenida para diversos especímenes de mampostería confinada a escala natural sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles (Sánchez T. A., 1998).

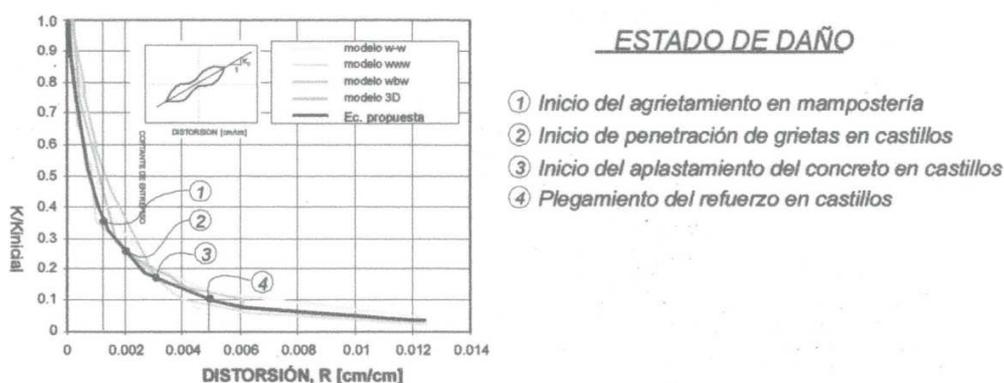


Figura 2.18.- Índice de degradación de rigidez y estados de daño en muros de mampostería confinada (Ruiz y Alcocer, 1999)

Como se observa, el valor inicial de la rigidez deteriora más del 50% para un nivel de distorsión propio al inicio del fisuramiento inclinado en la superficie de los paneles de mampostería ($R = 0.13\%$ en promedio). Basándose en los resultados experimentales, el *índice de degradación de rigidez lateral* para muros

de mampostería confinada en función del nivel de distorsión está dado por la siguiente relación

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

donde α y β son parámetros que definen la degradación de rigidez y R es la distorsión lateral definida como el desplazamiento 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. Para la estimación de K_e en estructuras de mampostería confinada pueden encontrarse en la literatura. El Gobierno del Distrito Federal (2002) propone valores de distorsiones inelásticas permisibles según el tipo de pieza (maciza o hueca) y del refuerzo (reforzada, confinada, confinada y con refuerzo horizontal, etc.).

Durante los sismos recientes se ha observado la formación de un mecanismo de *piso suave* en la planta. Es decir, ante cargas laterales sísmicas se concentran las deformaciones inelásticas en la planta baja, mientras el segundo nivel permanece casi elástico; a consecuencia de lo anterior el daño se concentra en la superficie de los muros. En la Figura 2.19 se muestra el desplazamiento en la etapa de comportamiento inelástico, para una estructura de mampostería.

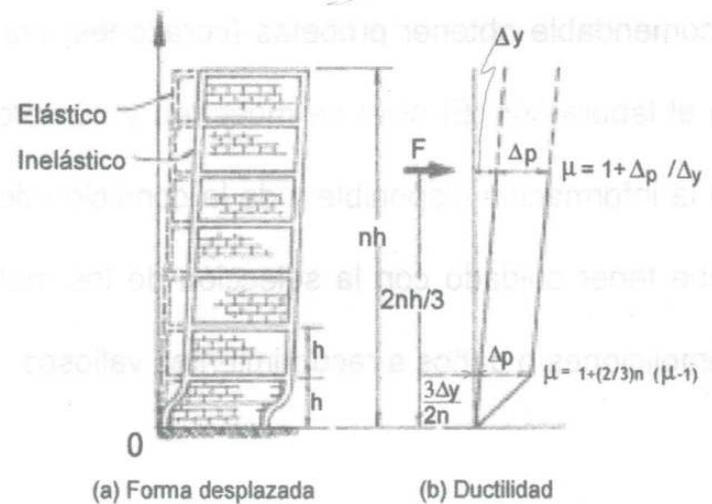


Figura 2.19.- Fenómeno de piso suave producido por desplazamiento inelásticos en planta baja (Paulay y Priestley, 1992)

Ruiz (1998) sugiere limitar la distorsión de entrepiso a un valor máximo de 0.30%, con el 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. Evidentemente a la anchura de las grietas en la superficie de los muros de mampostería, y dada la importancia de los castillos, se debe incluir en el grado y estado de daño de las tablas de evaluación postsísmica para muros de mampostería confinada la siguiente descripción referente a la condición de los castillos:

Ligero. Sin daño aparente, ligeras fisuras horizontales en los extremos de los castillos.

Fuerte. Con daño incipiente, indicios de la incursión de las grietas inclinadas en los extremos de los castillos

Grave. Con daño severo, grietas inclinadas que incursionan en los extremos de los castillos.

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA.

En este capítulo se conocerá los procedimientos de inspecciones de una construcción para posteriormente la rehabilitación de la misma.

Las evaluaciones y análisis deben realizarse por un profesional del diseño, pues la rehabilitación de un edificio existente depende de la importancia del mismo, así como del tiempo y los recursos disponibles. Se pueden practicar diferentes niveles de evaluación. A diferencia de un edificio nuevo, el diseñador se enfrenta con construcciones existentes las cuales fueron hechas basadas en reglamentos anteriores a los actuales. En algunos casos, con estructuras construidas por autoconstrucción. Por ende, para cualquier evaluación y análisis, se requiere una planeación asegurando entender perfectamente el comportamiento estructural.

Antes de iniciar las actividades de evaluación y análisis es conveniente que el diseñador y el cliente acuerden y documenten los trayectos del proyecto de rehabilitación. En específico, es conveniente:

- Que la estructura existente y la rehabilitada satisfagan los definidos requisitos del reglamento en vigor.

- Establecer los objetivos y metas que se deben alcanzar con la rehabilitación.
- Se deben considerar los recursos financieros y el presupuesto destinados por el cliente, con el fin de detectar las limitaciones a los objetivos y metas

Es importante que la persona que contrata los servicios de un diseñador considere que los objetivos de desempeño son metas, mas no garantías de comportamiento de las estructura.

3.1.- Evaluación de edificios existentes.

El término *evaluar* se refiere a la revisión e investigación técnica de la estructura existente, tipos de elementos y de materiales de construcción, sus condiciones y deficiencias, así como cualquier característica notable al análisis y diseño estructural. En la evaluación se considera también elementos fabricados con otros materiales además de la mampostería.

Una de las dificultades para la evaluación es conseguir un nivel de confianza sobre las condiciones “reales” del edificio y su comportamiento. De la misma forma, al inicio, se desconocen las propiedades de los materiales, los esfuerzos en los elementos, y el flujo de fuerzas, entre otras. No obstante, la meta de la evaluación es identificar las variables y características relevantes de una estructura para el desarrollo de un análisis estructural completo.

3.2.- Registro documental de diseño y construcción

Es importante recaudar toda la información posible respecto a la construcción en estudio. Esto incluye antigüedad, cálculos, especificaciones, normas, planos de diseño, modificaciones al proyecto, dictámenes, inspecciones, determinaciones de propiedades de los materiales, y cualquier otra evidencia que ayude al diseño original y a la configuración actual. El nivel de la información recabada establece el esfuerzo preciso para entender el edificio existente.

3.3.- Inspecciones.

La inspección del edificio es inevitable para confirmar que la información obtenida refleje las condiciones existentes, como, para identificar si hubo algún daño por acciones anteriores. En una inspección se deben analizar tres factores.

1) Configuración de la estructura.

En el aspecto de la configuración de la estructura se comprueban las dimensiones del edificio, el arreglo de los elementos y las propiedades mecánicas de los materiales. Para obtener las dimensiones de los elementos se emplea cintas métricas y equipos topográficos; pero, el armado de un castillo u otro elemento de concreto es necesario retirar el recubrimiento. De tal manera que sean de calidad los registros obtenidos, determinando así la profundidad de la inspección de la configuración estructural.

2) Condición de la estructura.

La inspección de la condición estructural se refiere a la evaluación de puntos de aplicación de carga, signos de deterioro e influencia del ambiente. Si se perciben señales claras de daño, es válido recurrir a técnicas de ensaye destructivo y no destructivo. Se debe observar con atención las uniones entre muros de mampostería, y sistemas de piso, ya que en las conexiones se transmiten las cargas y la disipación de energía; todo ello influye en el comportamiento sísmico, y son generalmente modificadas durante la construcción. En esta inspección es atinado el recurrir a la mezcla de inspecciones visuales, retiro de recubrimiento y evaluación no destructiva para situar refuerzos e identificar su diámetro y grado estructural.

Asimismo, es preciso evaluar las propiedades mecánicas de los materiales y cuantificarlas mediante ensayes. Igualmente de aquellos muros que resisten las mayores acciones, así como los que estén expuestos a ambientes agresivos, o cerca de las cimentaciones.

3) Deficiencias de la estructura.

La mala eficiencia de una estructura pueden ser el resultado de irregularidades (en planta o en elevación), elementos o zonas de la estructura más débiles que otras, presencia de edificios vecinos, materiales de mala calidad, un mal sistema estructural, amenazas por condiciones del suelo, entre otras.

3.4.- Propiedades de los materiales.

Dentro de un estudio de un edificio para su rehabilitación, lo difícil es llegar a los materiales con los que están contruidos los elementos de carga, pues es necesario evaluar sus propiedades. Cuando se encuentra con elementos de concreto se recomienda obtener probetas (corazones) con taladros para su análisis en el laboratorio. El nivel de muestreo y número mínimo de pruebas depende de la información disponible y de la condición del edificio (Mendoza C. J, 1991). Para evitar demoliciones o daños graves a recubrimientos valiosos de la edificación en estudio, es recomendable seleccionar adecuadamente los métodos de muestreo.

3.5.- Evaluación de grietas.

La falla más común en la mampostería son las grietas en los muros, y no del todo el colapso, ya que por éstas se puede dañar la estructura. En el diseño el objetivo es eliminar las grietas o limitar su anchura a valores tolerables. No obstante, las grietas pueden ser indicio de un posible colapso, alterar la apariencia arquitectónica, o servir como entrada para lluvia y otros agentes agresivos.

Aún no se ha desarrollado una clasificación universal y absoluta referente a la anchura de grietas que pueden ser consideradas peligrosas, ya que depende de la forma de la grieta, la función de la estructura, entre otras.

A continuación se presenta en la tabla 3.1 una posible clasificación de grietas respecto a su anchura y su nivel de exposición de la estructura. (Grimm C.T., 1988).

Tabla 3.1.- Clasificación de grietas según el nivel de exposición de la estructura.

Categoría		Anchura de grieta AG, mm
Muy finas	Impermeable	$AG < 0,15$
Finas	Exposición exterior	$0,15 < AG < 0,30$
Mediano	Exposición interior–húmeda	$0,30 < AG < 0,50$
Extenso	Exposición interior–seca	$0,50 < AG < 0,60$
Severo		$AG > 0,60$

Por otro lado, Rodríguez y Castrillón (1995) han propuesto criterios diferentes para determinar el grado de daño en muros de mampostería por sismo (tabla 3.2). Es importante consultar dicha referencia para clasificar la edificación dañada. Así mismo, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (Gobierno del Distrito Federal, 2002) también considera cinco niveles del daño.

Tabla 3.2.- Criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería después de un sismo.

Grado	Estado de Daño
I	Grietas pequeñas, difícilmente visibles sobre la superficie del muro. Grietas mínimas en castillos y dalas de confinamiento. Grietas con anchuras menores que 0,2 mm.
II	Grietas claramente visibles sobre la superficie del muro, con anchuras entre 0,2 y 1 mm.
III	Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas. Grietas grandes en la superficie del muro, con anchuras entre 1 y 3 mm
IV	Agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas, o en muros de relleno ligado a marcos; grietas con anchuras mayores que 3 mm. Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas
V	Desprendimiento de partes de piezas. Aplastamiento local de la mampostería. Prolongación del agrietamiento diagonal en castillos o en dalas (anchuras de grietas superiores a 1 mm). Agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas. Deformación, inclinación horizontal o vertical apreciable del muro.

Generalmente, una grieta en un elemento de mampostería no conserva un ancho uniforme, sino que tiene variaciones del 40 por ciento; significando esto que la anchura máxima puede ser hasta del doble de la anchura media en un solo elemento. El diseñador con el objeto de entender el comportamiento de la estructura, debe registrar lo siguiente:

- Patrón de grietas (horizontal, vertical, inclinado, ...etc.)

- Longitud
- Anchura (uniforme o variable uniformemente)
- Profundidad (indicar si pasa a través de recubrimiento)
- Edad

La forma para medir la anchura de las grietas, es por medio de la comparación de éstas con láminas plásticas que tienen marcas de diferentes anchuras llamado comparador de grietas o *grietómetro*. Lo cual para tener una mejor precisión se utilizan lentes de aumento (Fig. 3.1).



Figura 3.1.- Comparador plástico de grietas o grietómetro.

Para mediciones más precisas o de largo plazo, es conveniente recurrir a transductores de desplazamientos (de corriente directa o alterna) conectados a equipos electrónicos de captura de información. Es primordial que se determine si la grieta está *activa* o es *pasiva* dentro de la evaluación de una estructura de mampostería. Las *activas* manifiestan deslizamientos y anchuras mayores y las *pasivas* no cambian ni en anchura ni longitud.

Existen tres métodos para detectar los movimientos de las grietas:

1. Mediciones periódicas. Realizadas por medio de las láminas de plástico antes mencionadas (Fig.3.1). Las mediciones se hacen sobre una misma grieta y en tres o cuatro lugares seleccionados con anterioridad.

2. Testigos de yeso. Es conveniente usar agua caliente para acelerar el fraguado del yeso y registrar la fecha de colocación. Así mismo, es importante cuidar que el testigo no se agriete por la contracción del yeso.

3. Monitores plásticos de grietas. Cuenta con dos piezas plásticas que se adhieren una en cada lado de la grieta en estudio (Fig. 3.2). En la pieza de plástico translúcido se encuentra marcado un par de ejes ortogonales; en la de plástico opaco, que se coloca por debajo de la anterior, tiene una cuadrícula graduada marcada. El monitor se instala de tal manera que los ejes ortogonales coincidan con el cero de la cuadrícula graduada. Las piezas se pueden desplazar relativamente sin restricción. Conforme la grieta se mueve, los ejes ortogonales marcan la magnitud de desplazamiento en sentido vertical y horizontal.

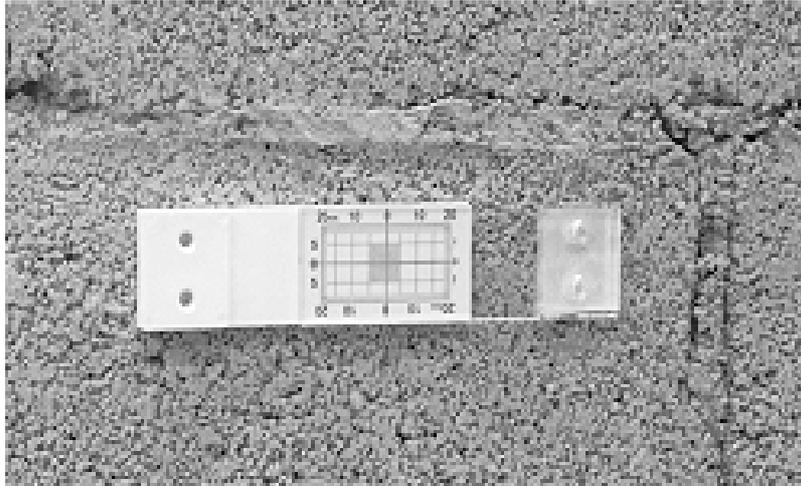


Figura 3.2.- Monitor plástico de abertura de grietas.

3.6.- Técnicas de evaluación y ensayos en sitio de estructuras de mampostería.

A continuación, se describirán algunos de los principales métodos para evaluar la mampostería (Suprenant y Schuller, 1994). No todos los métodos son no destructivos; algunos son de extracción o remoción de probetas. Otros dejan manchas de grasa, agujeros u otras marcas que pueden ser no aprobados desde un punto de vista estético o arquitectónico.

Habitualmente para la extracción de algunas probetas, como corazones, se requiere de agua para enfriar la broca durante el barrenado, el uso del agua puede ocasionar daños en los acabados interiores y exteriores. Además, algunas pruebas producen polvo, ruido, radiación y cascajo. Existen métodos de prueba

necesitan contar con energía eléctrica, gas, aire comprimido, accesos especiales, andamios, equipos de izaje, y otros.

Algunos de los métodos miden directamente la resistencia; algunos otros requieren de correlaciones con pilas o corazones para evaluar la resistencia, otros más, como el martillo de rebote (o de Schmidt) y pruebas de penetración, son útiles para indicar la uniformidad de la mampostería. En la tabla 3.3 se presenta la aplicabilidad en mampostería de algunos de los métodos que serán discutidos sus ventajas y desventajas; en términos generales, se puede considerar que son las mismas para concreto.

3.6.1.- Inspección visual.

Esta investigación consiste en observar las grietas, los efectos de intemperismo, el deterioro del mortero, corrosión, eflorescencia y otros defectos que pueden ser detectados mediante la ayuda de lupas de baja potencia. En este método se incluyen mediciones de asentamientos diferenciales, así como el uso de equipos de fibra óptica para detectar vacíos y grietas internas.

Método de Prueba	
Condición	
	Inspección visual Martillo de rebote Extracción Barrenado Penetración Ensayes a corte Corazones Adherencia mortero-niebla Gatos planos Velocidad de pulso Impacto eco Magnético Radiografías Termografía infrarroja Microondas Resistividad de la mampostería Potencial de corrosión Petrografía Pruebas de carga
Resistencia de las piezas	X
Resistencia en el plano	X X X X X X X X X
Uniformidad en el plano	X X X
Deformabilidad en el plano	X
Nivel de esfuerzos en el plano	X
Localización de grietas	X X X
Movimiento de grietas	X
Desempeño ante carga	X
Tamaño de barra, localización y recubrimiento	X X X
Localización de anclas	X X X
Vacios en mortero fluido	X X X X
Vacios en la mampostería	X X X X
Corrosión del acero de Refuerzo	X X
Problemas de durabilidad	X X X X

Tabla 3.3.- Aplicabilidad de los métodos de evaluación y ensayos en sitio.

3.6.2.- Martillo de rebote.

El uso de este martillo de acero, establece la uniformidad en la mampostería, también para delimitar las zonas de mampostería débil o de baja calidad. El martillo está formado por un pistón de acero endurecido que se coloca

en el muro de mampostería y después es empujado por un resorte conectado a una masa Fig.3.3. Dicha masa rebota de la superficie; la distancia de rebote es medida en una escala arbitraria para determinar la dureza.

Existen varios tipos de martillo: el N, es para piezas de arcilla, no obstante, puede dañar las piezas de arcilla antiguas o las de concreto; el L, que es para piezas suaves; y el P (tipo pendular), que se emplea para juntas de mortero o materiales de baja resistencia. Actualmente los martillos modernos cuentan con registradores automáticos de lecturas, sea mediante impresoras en papel o de memoria digital.



Figura 3.3.- Martillo de rebote o esclerómetro.

Este método se debe hacer lejos de orillas, aberturas, piezas desconchadas o agrietadas; ocasionalmente, es necesario desbastar la superficie para obtener un plano liso, es decir, las pruebas se deben realizar de modo que el martillo sea

ortogonal a la superficie de la mampostería. Es importante revisar la calibración del martillo, en específico si el uso del equipo es intensivo.

Es recomendable que la prueba se realice 10 veces sin retirar la punta del pistón y considerar las cinco lecturas mayores para determinar su media así pues será el número de rebote. También las lecturas se pueden presentar en gráficas con isolíneas o líneas de igual valor como se muestra en la Figura 3.4.

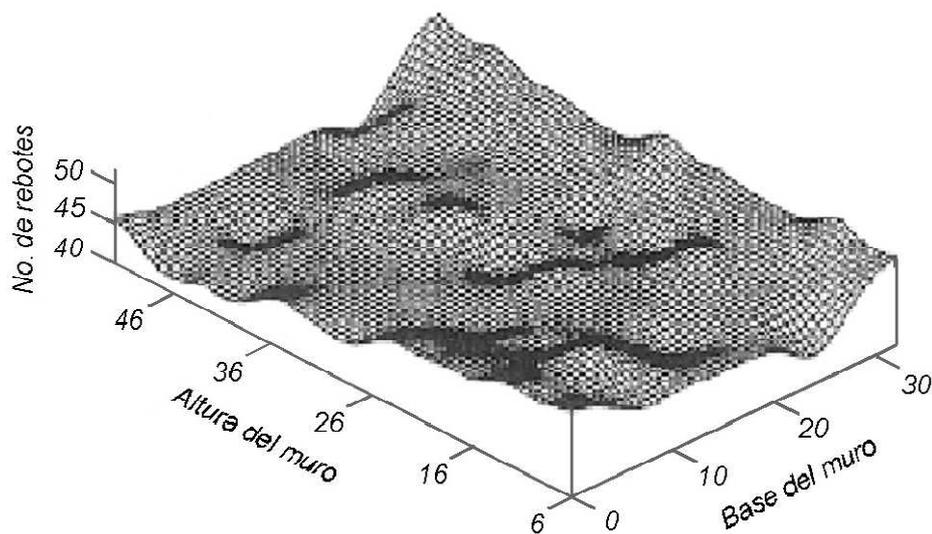


Figura 3.4.-Ejemplo de aplicación del martillo de rebote para determinar la uniformidad de la superficie de un muro de mampostería.

Estas gráficas son útiles para identificar las tendencias generales en la dureza superficial. La correlación entre el número de rebote y la resistencia de la mampostería a compresión es baja. Si se desea obtener este valor, es recomendable ejecutar ensayos destructivos para poder correlacionarla con el

número de rebote. El martillo de rebote permite conocer la condición general del material y sirve de base para evaluaciones más detalladas.

3.6.3.- Pruebas de extracción.

Las pruebas de extracción, determinan la resistencia a tensión o cortante de anclas o conectores instalados en mampostería, además que se usan para evaluar la adecuada instalación de conectores.

El ancla se instala mediante resinas epóxicas en la pieza o en la junta. La fuerza medida se puede relacionar con otras pruebas que estiman la resistencia a tensión, pero también se pueden emplear para evaluar la uniformidad del material. Las pruebas de extracción también se usan para evaluar la adecuada instalación de conectores (Fig.3.5).

Esta prueba se puede usar para aprobar un criterio de comportamiento basado en desplazamientos del conector. Así, la fuerza necesaria para que el conector alcance el desplazamiento señalado se considera como la resistencia última. “El uso de este método para medir directamente las resistencias a compresión, tensión o cortante ha sido poco prominente; las correlaciones han sido muy variables” (Suprenant B.A. y Schuller M.P., 1994).

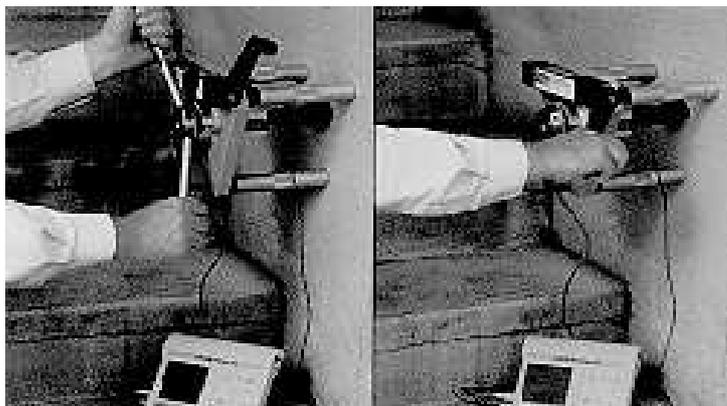
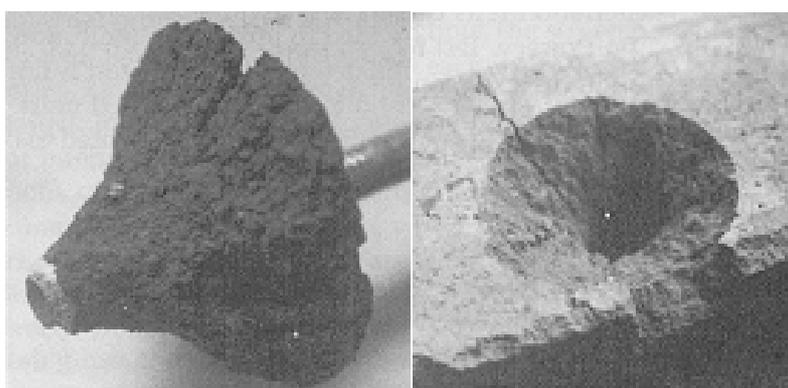


Figura 3.5.- Equipo para la prueba extracción de conectores.

La ventaja de este método es que el daño en la mampostería es muy reducido, ya que las probetas de extracción son ligeramente destructivas y dejando marcas en forma de cono y grietas, pero ello es de fácil reparación si la apariencia es importante. Sin embargo, los conos dan información de las propiedades locales exteriores de las piezas y mortero, pero no dan datos sobre la condición del interior de la mampostería (Fig. 3.6).



**Figura 3.6.- Falla típica de extracción de un conector embebido en mampostería.
La fuerza de extracción y el cono de mampostería formado son indicadores de la resistencia de la misma.**

Los detalles sobre el método de prueba se pueden consultar en la norma ASTM E 488-90 "Métodos de prueba para determinar la resistencia de anclas en elementos de concreto y mampostería".

3.6.4.- Barrenado.

Este método mide la energía consumida para perforar una junta de mortero con una broca. Se usa para determinar la uniformidad de las juntas, así como para identificar áreas de mortero deteriorado.

3.6.5.- Prueba de penetración.

Esta prueba sirve para conocer la uniformidad de las piezas y las juntas. La profundidad de penetración es afectada por la resistencia, rigidez y densidad del material que rodea la zona, así como por la deformación elástica de la masa contra la que las probetas son disparadas. Estas pruebas suelen ser más útiles para determinar la resistencia del mortero que la resistencia a compresión de la mampostería.

El equipo, consiste en un aparato con forma de pistola que dirige una carga (empuje neumático producido con un cartucho de pólvora o bien resultado de un resorte comprimido) contra el espécimen en estudio. Además dicho instrumento

cuenta con un dispositivo de seguridad para evitar que se dispare si no se presiona firmemente contra la superficie de mampostería.

El equipo tiene dos niveles de potencia: el bajo, para mortero y piezas suaves con resistencias a la compresión esperadas de 14 MPa (140 kg/cm²), y el alto, para piezas de arcilla y mampostería con huecos rellenos con mortero.

La penetración se mide con un micrómetro con precisión de 0,02 mm y es necesario usar protección en la cara y ojos cuando se opere la herramienta, ya que es frecuente que la superficie de la mampostería se desconche. También es primordial que la prueba se ejecute sobre partes sólidas de piezas, no sobre las paredes de alvéolos; la superficie debe ser relativamente lisa, de modo que pueda asentar la pistola adecuadamente.

El número de ensayos depende del tamaño de la zona bajo evaluación y una vez que ha penetrado la sonda, se debe revisar, que no haya quedado suelta, descartando las que no fueron instaladas perpendicularmente a la superficie o las sueltas. Lo cual para medir la profundidad de penetración, se deben retirar las sondas o conectores. Indudablemente, las sondas de acero penetran más en materiales débiles, suaves o porosos que en aquéllos más duros y densos. Igualmente, penetran más en mampostería deteriorada que en sana. La interpretación de los resultados arroja áreas de materiales deteriorados o de baja calidad.

Ensayes de laboratorio muestran correlaciones con la resistencia a la compresión que varían entre 0,6 a 0,95 (Suprenant B.A. y Schuller M.P., 1994)

3.6.6.- Ensayes a corte en el plano de piezas y elementos.

Es uno de los métodos más aceptados para determinar la resistencia a cortante de la mampostería. En él, se mide la resistencia a la fuerza cortante rasante de una junta de mortero, desplazando horizontalmente una pieza de mampostería con un gato hidráulico (o bien con un gato plano), Figura 3.7.

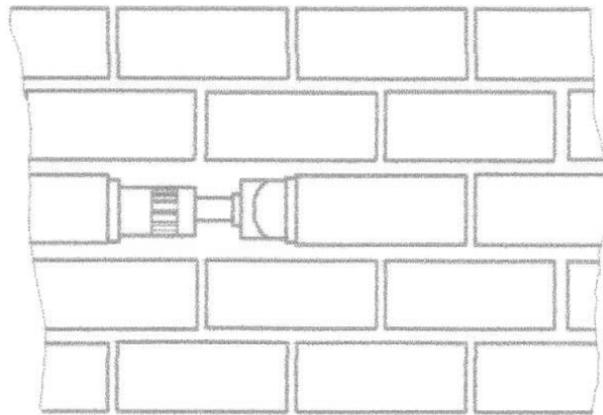


Figura 3.7.- Ensaye de corte en el sitio.

Este método se ha hecho obligatorio en varias municipalidades del estado de California, EUA, para ayudar a determinar la resistencia sísmica de edificios de mampostería simple. No obstante, los resultados de la prueba no deben interpretarse como valores absolutos de la resistencia al corte de la mampostería. La resistencia al corte obtenida se puede extrapolar a la de todo el elemento de mampostería, debido a que el modo de falla es similar: agrietamiento siguiendo las

juntas de mortero ya que la resistencia a la adherencia del mortero es menor que la de tensión de las piezas.

El equipo requerido para esta prueba es simple: un taladro y brocas para retirar el mortero, cinceles y martillos, un gato hidráulico calibrado, bomba hidráulica manual con manómetro de carátula, placas de acero de 12 mm de espesor, rótula para aplicar la carga, lanas y equipo de protección. En lugar de un manómetro de carátula, se puede usar una celda de carga o un manómetro electrónico. En ocasiones, es conveniente medir el desplazamiento de la pieza cargada mediante un transductor de desplazamiento.

La mayoría de las normas establecen la práctica de una prueba por cada 150 m² de superficie de muro, así el número mínimo de pruebas en una estructura es de ocho. La prueba se debe hacer en lugares representativos de las características de los materiales, calidad de la mano de obra, intemperismo y deterioro. Se deben evitar las piezas rotas, o lugares donde las juntas no sean paralelas, ya que los resultados no serían representativos.

En las pruebas de corte, la resistencia se define como la carga asociada al primer deslizamiento de la pieza respecto al mortero. Para poderla determinar de manera confiable, es bueno colocar transductores de desplazamiento (mecánicos o electrónicos). En ocasiones, el mortero se dilata (aumento de volumen), promoviendo un trabajo de cuña sobre la pieza y, por tanto, aumentando la resistencia al deslizamiento de la pieza. Este incremento es ficticio, de ahí que

convenga obtener la curva carga-desplazamiento de todo el ensaye. El cambio de pendiente de la curva estará asociado al primer deslizamiento de la pieza.

La resistencia de la junta de mortero se calcula como el cociente de la carga aplicada al primer deslizamiento y el área total de las juntas superior e inferior ensayadas. De los resultados de esta prueba, se debe calcular, a su vez, el valor asociado al valor indicado en las normas de diseño de la localidad. Es usual obtener resultados con coeficientes de variación de entre 20 y 30 por ciento. En ocasiones, se hace uso de la técnica de gatos planos para controlar la magnitud del esfuerzo normal que obra sobre la pieza. Este método elimina las incertidumbres sobre el esfuerzo normal existente y ofrece la oportunidad de determinar la relación entre el desempeño a cortante y el esfuerzo normal.

El análisis de la información se hace suponiendo un modelo de comportamiento de tipo Mohr-Coulomb. Así, en el plano esfuerzo cortante-esfuerzo normal se ajusta una línea recta que representa la superficie de falla. La pendiente de esta línea recta es el coeficiente de fricción, μ .

En ocasiones, las pruebas de corte en el sitio de piezas y de corazones no dan la suficiente información acerca del comportamiento a cortante de la mampostería; en particular, la razón se debe a la dificultad de extrapolar las características de comportamiento de especímenes pequeños a una estructura a escala real.

3.6.7.- Ensaye de probetas extraídas o corazones.

Este método mide la resistencia a cortante-adherencia de las piezas y el mortero mediante el ensaye a compresión de corazones con diámetros cercanos a la longitud de una pieza, comúnmente corazones de 200 mm de diámetro.

Este método ha estado en desuso por la dificultad de obtener corazones inalterados en mamposterías con morteros débiles (comúnmente de cal) o mampostería de barro; sus limitaciones son la afectación estética del edificio, así como elevados coeficientes de variación, incluso muy superiores al 30 por ciento; en estos casos, es recomendable seguir el método descrito en la sección anterior.

3.6.8.- Medición de la adherencia mortero-pieza.

Mediante un sencillo aparato se aplican esfuerzos de flexión a la junta de mortero de modo de medir la adherencia mortero-pieza. Consta de una mordaza que se coloca sobre una pieza, y de una llave para aplicar el momento flexionante (Fig. 3.8). Debido a irregularidades en las caras de las piezas, se colocan láminas de neopreno entre la mordaza y la pieza. Se aplica una carga axial y un momento flexionante con respecto al eje longitudinal de la pieza (y de la mordaza). El cálculo del esfuerzo máximo de tensión se hace aplicando la fórmula de la escuadría.

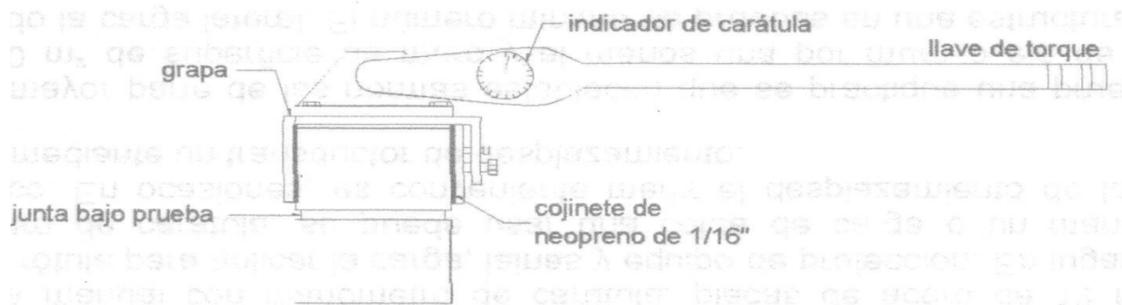


Figura 3.8.- Aparato para la prueba de adherencia en el sitio.

El ensaye requiere retirar las piezas arriba de la pieza por cargar, así como las juntas verticales en los costados de dicha pieza. Antes de retirar las juntas verticales, se recomienda precomprimir la pieza de modo de evitar dañar la adherencia con la vibración. La mordaza se fija a la pieza mediante tornillos con punta que se insertan en la pieza mediante alguna llave o pinza. Se recomienda que el torque de fijación de los tornillos a la pieza sea el mismo en todos los ensayos. Es indispensable que la carga vertical se aplique en el mismo lugar del torquímetro durante el ensaye, así como que se registre su ubicación ya que es indispensable para el cálculo de la adherencia. El plano de falla puede pasar por la interfaz pieza-mortero, a través de la pieza, o del mortero.

Puesto que la adherencia es afectada por varios factores, entre ellos la mano de obra y el ambiente, es necesario un amplio muestreo para obtener un nivel de confianza razonable de los resultados. Como mínimo, se deben ejecutar entre cinco y 10 pruebas por cada área por ser investigada.

3.6.9.- Gatos planos.

La técnica de gatos planos permite medir el estado de esfuerzos a compresión en la mampostería mediante la colocación de un gato plano en una inserción practicada en la junta de mortero. Se aplica presión en el fluido hidráulico del gato hasta que se restituya la distancia original entre dos puntos, uno arriba y otro abajo de la inserción. Si se colocan dos gatos planos en inserciones paralelas, y se aplica presión en ellos, es posible obtener la curva esfuerzo – deformación de la mampostería. Se ha demostrado, experimental y analíticamente, que el efecto de redistribución de carga y las deformaciones no lineales están dentro de la precisión del método. Se ha estimado que el error en la determinación del estado de esfuerzos es de hasta 20 por ciento (Suprenant B.A y Schuller M.P., 1994).

Para la evaluación de la mampostería usando gatos planos se pueden usar las normas ASTM C 1196-91 y C 1197-91, en las cuales se dan los métodos de prueba para determinar, en sitio, el estado de esfuerzos y las propiedades de deformabilidad de la mampostería, respectivamente.

El estado de esfuerzos a compresión en la mampostería, inducido por cargas gravitacionales, cambio térmicos o por contracción de los materiales, se puede medir usando un gato plano. Ofrece la ventaja de que en el ensaye no existen hipótesis sobre los flujos de fuerzas u otros. Una limitación es que el

estado de esfuerzos medido corresponde exclusivamente al de la hilada ensayada.

Para colocar los gatos planos, se requiere practicar una ranura en el mortero (Fig. 3.10). Para mampostería densa y de alta resistencia, se recomienda usar discos de diamante enfriados con agua; para mamposterías antiguas, es preferible barrenar el mortero en serie de modo de ir formando una ranura. Se deben evitar los rotomartillos, ya que la vibración puede debilitar la adherencia de las juntas de mortero adyacentes. La ranura se debe limpiar de partículas antes de colocar el gato.

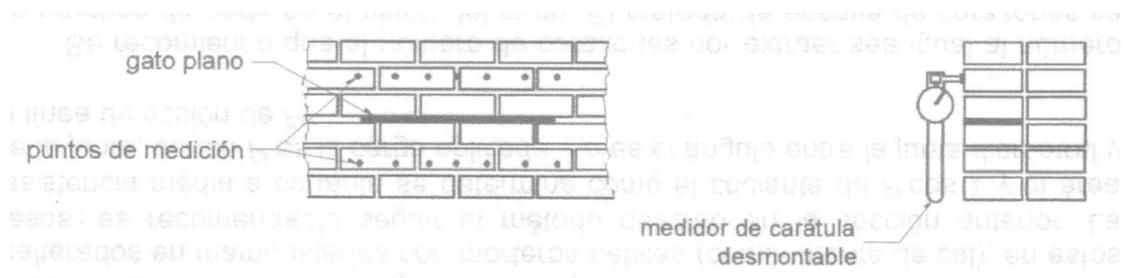


Figura 3.10.- Dispositivo de prueba para la determinación in situ del estado de esfuerzos de compresión existente dentro de la mampostería.

Los gatos planos pueden ser fabricados con cualquier forma y tamaño. Para determinar la deformabilidad de la mampostería, así como el estado de esfuerzos, se recomiendan gatos rectangulares, con longitud igual o superior a dos veces la

longitud de la pieza. Se pueden usar gatos más pequeños, de forma semicircular, para ser insertados en cortes practicados con disco.

Éstos se deben usar solamente para medir el estado interno de esfuerzos. Los gatos planos se fabrican tal que su deformación sea proporcional con la presión del fluido hidráulico. Antes de su aplicación, se requiere calibrar el gato plano para obtener la relación entre la presión aplicada y el esfuerzo en la mampostería. Será necesario calibrar de nuevo el gato plano cuando se someta a deformaciones considerables.

Con objeto de facilitar la instalación y remoción del gato plano, se recomienda usar laines metálicas de tamaño y forma similares a las del gato. Las laines son necesarias porque si se cerrara la ranura sobre el gato y lo aplastara, cambiaría la constante de calibración y podría dañar al gato. Si se desea una transferencia de esfuerzos uniforme, es recomendable usar gatos adicionales que funcionen como laines.

Para medir la deformación axial de la mampostería se deben usar transductores con una precisión de 0,005 mm. Esta precisión se puede mejorar si se usan instrumentos electrónicos. En cuanto al lugar de aplicación de la prueba, se recomienda que sea en zonas alejadas de las aberturas, cambios de sección transversal u otras concentraciones de esfuerzos.

Para obtener resultados consistentes y válidos, se deben evitar juntas irregulares, huecos de gran tamaño o número, o piezas rotas o agrietadas. Cuando interese evaluar la mampostería de muros de gran espesor conviene tener presente que las propiedades pueden variar en el espesor debido a que los materiales pueden ser distintos. Así, se deberá decidir sobre realizar la prueba, ya sea empleando gatos que cubran todo el espesor, o bien con gatos que abarquen las piezas que componen el exterior del muro.

Dada la variabilidad de los resultados, se recomienda que se practiquen entre tres y cinco pruebas en la zona de interés. Para medir las deformaciones axiales de la mampostería en la modalidad de determinación del estado de esfuerzos a compresión, se recomienda no colocar los puntos fijos de medición en la hilada inmediatamente arriba de la ranura, ya que se pueden dañar las piezas. Asimismo, es conveniente tener, cuando menos, tres líneas de medición y promediar los datos.

Para medir la deformabilidad axial de la mampostería, se ha verificado que una separación entre gatos planos de tres a cinco hiladas es adecuada. Además, se ha demostrado analíticamente que el estado de esfuerzos es más consistente en el tercio medio de la longitud del gato. Atendiendo a esto, se recomienda instrumentar esta zona con tres líneas verticales de medición. El módulo de rigidez axial de la mampostería se puede calcular siguiendo lo establecido en el método de prueba del proyecto de Norma Mexicana (ONNCCE, 2002a).

3.6.10.- Técnicas de transmisión de pulso.

Estas son las más frecuentes dentro de los métodos de evaluación no destructiva. El principio de las pruebas es simple: se mide el tiempo que tarda una onda (pulso o tren de ondas) en atravesar la mampostería. La onda es generada por un transductor electro-acústico o por golpe de un martillo. La técnica facilita la determinación de la uniformidad o cambios en propiedades de la mampostería, así como el nivel y extensión del deterioro, agrietamiento o huecos en la estructura. Las bajas velocidades están asociadas a materiales de baja calidad, agrietados o deteriorados

Si simultáneamente a las pruebas de velocidad de pulso, se ejecutan ensayos destructivos o no destructivos para determinar la resistencia de la mampostería, es posible correlacionar los valores de ambos tipos de pruebas. Los investigadores han encontrado correlaciones aceptables con la resistencia a compresión y pobres con las resistencias a tensión y corte, otros han concluido que es necesaria una gran cantidad de datos de todos los tipos de prueba para establecer predicciones confiables mediante velocidad de pulso (Suprenant B.A.y Schuller M.P., 1994).

Frecuentemente se pone en duda la validez de las técnicas de transmisión de pulso cuando existe acero de refuerzo en el elemento por evaluar. La inquietud radica en que la velocidad de transmisión de pulsos del acero es

considerablemente superior a la de la mampostería, y que puede afectar las mediciones.

Se ha encontrado que si el acero es perpendicular a la dirección de transmisión, su efecto es despreciable; no así cuando existen barras de acero en la dirección de transmisión. En este último caso, se debe desechar la medición.

3.6.10.1.- Velocidad de pulso ultrasónico.

Los equipos son portátiles y se pueden operar por una o dos personas. Por lo general, el equipo (Fig. 3.11) consiste de dos transductores (un transmisor y un receptor), unidad de proceso, cables, probeta de calibración y medio de acoplamiento (grasa, por lo general).



Figura 3.11.- Equipo de transmisión de pulsos ultrasónicos.

Los transductores son de tipo piezoeléctricos. Los normales son de 50 mm de diámetro y transmiten a una frecuencia entre 50 y 100 kHz. La onda viaja a través de la grasa y la mampostería, hasta llegar al receptor, cuyo cristal transforma la energía mecánica en eléctrica y envía la señal a la unidad de procesamiento.

3.6.11.- Métodos Magnéticos.

Permiten localizar barras y otros elementos de acero mediante aparatos portátiles de tipo magnético. Los modernos permiten determinar la distancia de la barra de la superficie, así como el tamaño de la barra de refuerzo (Fig.3.12).

Esta técnica se basa en la medición de las variaciones en el campo magnético inducido, las cuales son proporcionales a la profundidad y/o cuantía de acero.



Figura 3.12.- Moderno equipo para localizar barras de acero, y para determinar su diámetro y profundidad.

3.6.12.- Radiografía.

Se emplea radiación X o gamma para determinar la localización del refuerzo, así como para detectar huecos y defectos. Se usa una fuente de energía de rayos que ilumina una cara del elemento y una película sensible para registrar la imagen en la cara opuesta. Los rayos son alterados por la presencia de mortero, piezas, acero, o huecos que contribuyen a atenuar la energía. Actualmente, su uso es limitado ya que los equipos son costosos, dado el gran tamaño y peso, así como por el alto voltaje y radiación que obligan a ser operados por personal entrenado. Se requiere una interpretación cuidadosa, ya que la imagen es representativa de una zona en particular.

La radiación gamma se usa, además, para determinar los perfiles de humedad y sales en la superficie de un material. En el espectro de intensidades de rayos gamma se observan picos asociados a los elementos químicos presentes.

3.6.13.- Termografía de rayos infrarrojos.

Se obtiene una representación de alta resolución del calor emitido por el elemento; usando frecuencias infrarrojas para identificar patrones de calor característicos de ciertos defectos. La ventaja es que la evaluación se puede hacer a distancia, es decir, no se requiere acceso al elemento, y que se puede estudiar la estructura completa. La temperatura de la superficie del elemento se mide mediante un rastreador portátil conectado a una unidad de procesamiento de

información. La fuente de calor puede ser el sol o la temperatura interna del edificio.

Esta técnica se ha empleado con éxito para localizar grietas en concreto reforzado, desprendimientos de hasta 100 mm de diámetro, así como para identificar huecos en muros de piezas macizas en mampostería, acero de refuerzo, y áreas en donde el mortero fluido no penetró en muros de bloques de concreto rellenos. El método no proporciona información cuantitativa sobre las propiedades de la mampostería, pero permite evaluar grandes zonas y localizar áreas en las cuales se requiere más estudio. En la figura 3.13 se presenta la termografía de rayos infrarrojos de una barra de refuerzo ensayada a tensión simple en una máquina universal. Se aprecia con un tono gris oscuro la zona más caliente (parte inferior de la foto), que indica la sección más esforzada y, eventualmente, de falla.

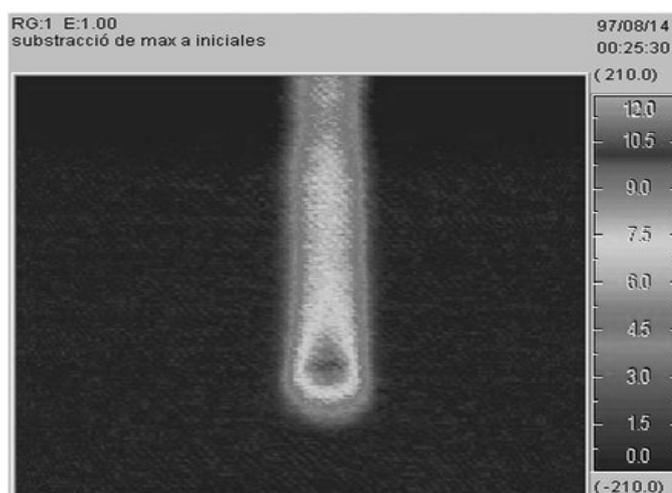


Figura 3.13.- Termografía de rayos infrarrojos de una barra de refuerzo a tensión.

3.6.14.- Microondas.

La aplicación de microondas a través de muros de mampostería detecta huecos en las celdas de bloques o ladrillos huecos rellenos con mortero o concreto fluidos (Bois, K.J., Campbell, H., Benally, A., Nowak, P.S. y Zoughi R. (1998). Esta técnica se emplea para predecir la relación cemento-arena del mortero, así como las relaciones agua-cemento y agregado grueso-cemento, y la resistencia a la compresión del concreto. El método parte de la capacidad reflejante de las microondas que tienen los materiales cerámicos.

El haz de microondas se aplica con una frecuencia menor que 5 GHz, cuando por lo general el intervalo de frecuencias es de 2,6 a 3,95 GHz (banda S). Se ha encontrado que este intervalo es adecuado en virtud de la mínima variación en las lecturas debido a la dispersión de la granulometría de la arena, así como porque para estas frecuencias la diferencia entre las propiedades dieléctricas del mortero o concreto de relleno y el aire es muy amplia. Para este intervalo de frecuencias la longitud de onda varía entre 76 y 114 mm, lo que la hace apta para ser empleada sobre ladrillos o bloques que tienen mayores espesores.

3.6.15.- Resistividad de la mampostería.

Este método consiste en medir las propiedades eléctricas de piezas saturadas para correlacionarlas con las propiedades mecánicas, especialmente con la resistencia a la compresión. Además esta técnica se ha aplicado para

establecer la porosidad del material, misma que influye en la resistencia, absorción y permeabilidad. En piezas de arcilla, la porosidad depende del tipo de arcilla usado, así como de la duración de la cocción.

El método se apoya en el hecho de que la resistencia eléctrica de la pieza disminuye cuando se satura con agua, tal que el material soluble en el ladrillo se disuelve, formando una solución iónica que puede conducir la corriente eléctrica. La resistencia eléctrica se mide a partir de un par de electrodos hechos de placas de acero inoxidable de 2 mm de espesor, adheridos a caras opuestas de la pieza mediante un mortero cemento-arena con proporcionamiento 1:1. En el caso de piezas huecas o multiperforadas, las placas de los electrodos poseen perforaciones para facilitar la salida del agua en exceso. Khalaf F.M., y Wilson J.G (1999) han encontrado resultados satisfactorios cuando aplicaron una corriente eléctrica a una frecuencia de 10 kHz.

Al comprobar que la resistencia eléctrica es un indicador válido de la resistencia a la compresión de diferentes tipos de piezas, queda señalar que las piezas pueden tener valores distintos de área superficial, de modo que el área transversal para conducción eléctrica pueda variar. En efecto, las piezas multiperforadas poseen un área superficial muy amplia a través de la cual se puede absorber el agua. Por tanto, se ha propuesto a la resistividad como un factor más apropiado para fines de evaluación ya que es una propiedad fundamental del material y considera la porosidad de la pieza.

3.6.16.- Potencial de corrosión.

En este método se determinan las mediciones en los cambios de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo de interés y una celda hecha con una esponja porosa saturada de solución de cobre y sulfato de cobre colocado sobre la superficie del elemento (Fig. 3.14). Las mediciones se presentan en forma gráfica como curvas de isotopotencial. Por lo general, se puede suponer que voltajes mayores que $-0,20V$ (menos negativos) están asociados a un 90% de probabilidad de que no exista corrosión; entre $-0,20$ y $-0,35V$ la corrosión es dudosa; y valores menores (más negativos) que $-0,35V$, indican un 90% probabilidad de corrosión. En cambio se obtienen valores positivos, significa que la humedad en el concreto es baja y los resultados son inválidos.



Figura 3.14.- Equipo portátil para medir el potencial de corrosión.

3.6.17.- Petrografía.

Este método se basa en observaciones microscópicas, algunas veces en combinación con otras técnicas, permitiendo evaluar muestras de mortero y piezas de mampostería. La técnica detecta contenido de aire, carbonatación, adherencia, ingredientes y dosificación del mortero, protecciones, contaminantes, entre otros.

3.6.18.- Pruebas de carga.

Se emplea una carga a la estructura o elemento estructural de modo de suponer estados límite de diseño. Midiendo y revisando las características de comportamiento estructural. Se sugiere seguir lo señalado en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Departamento, 1993) o el reglamento vigente en la localidad.

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN EN BASE AL DAÑO OBSERVADO.

En este capítulo se explicarán las diversas técnicas que se utilizan para llevar a cabo la rehabilitación de una edificación dañada por un sismo.

4.1.- Decisiones para la rehabilitación.

Existen diversas técnicas para llevar a cabo la rehabilitación de estructuras de mampostería, por lo que es necesario considerar una serie de factores para determinar cuál de ellas es la más adecuada en cada caso.

4.1.1.- Medidas a tomar después de un sismo.

Después de que ha ocurrido un sismo, es conveniente hacer una inspección rápida de las estructuras dañadas y tomar algunas medidas inmediatas, pues es importante considerar la ocurrencia de las réplicas que pueden dañar más la estructura o incluso precipitar su colapso parcial o total. El tipo de medidas que se deben de tomar depende mucho del nivel de daño visto. Si la estructura no presenta daño o sólo presenta daños ligeros, no es necesario hacer nada; el paso y/o uso de la estructura estará permitido. Si el daño es tal que afecta la resistencia del edificio a cargas laterales, se debe restringir el acceso mientras se realiza una evaluación más detallada; no obstante, es recomendable

colocar un apuntalamiento de emergencia. Finalmente, si el nivel de daño es alto u ocurrieron colapsos parciales, se debe prohibir el acceso al edificio y restringirlo a zonas adyacentes. Además se debe estimar que las zonas en pie del edificio se deben apuntalar.

Para el apuntalamiento de emergencia, se pueden emplear los apoyos verticales, horizontales, arriostramiento diagonal, tensores, colocación rápida de concreto en columnas muy dañadas empleando cimbras hechizas, retirar el material desprendido, reducir cargas en la estructura, etc.

4.1.2.- Criterios para rehabilitar una estructura.

Después concluir la evaluación, es necesario rehabilitar dependiendo de la decisión enfocada principalmente a minimizar la intervención y optimar los costos globales. La intervención debe considerar, lo siguiente:

- Costos, tanto iniciales como de largo plazo.
- Durabilidad de los elementos originales, de los nuevos y de las juntas entre ellos.
- Mano de obra y equipos disponibles
- Necesidad de mantener ocupado el edificio mientras se realizan los trabajos de rehabilitación
- Estética
- Conservación del carácter histórico

- Duración de la construcción.

La selección del tipo, la técnica, la dilatación y urgencia de la rehabilitación dependen de la información de la estructura recavada durante la evaluación.

En términos generales:

- Los edificios con alteraciones importantes, tanto en rigidez como en resistencia, deben rehabilitarse buscando disminuirlas o eliminarlas
- Si el edificio posee elementos no estructurales vulnerables a los desplazamientos esperados de la estructura, se recomienda incrementar la rigidez de manera apreciable
- Se deben satisfacer todos los requisitos que sobre la resistencia marcan los reglamentos locales; se debe buscar el mínimo de modificaciones de las rigideces específicas y el máximo incremento posible de la ductilidad particular disponible en la estructura
- Conviene calcular los cocientes de resistencia remanentes (como la razón entre la resistencia remanente y la resistencia original de un elemento o región crítica); estos cocientes pueden servir de guías para priorizar los trabajos de rehabilitación.

4.1.3.- Tipos de intervención en un edificio.

Siguiendo las recomendaciones señaladas, la intervención puede ser uno o la combinación de los siguientes tipos:

- No intervenir, a menos que se tengan que corregir algunos problemas de durabilidad
- Reducir la masa o restringir el uso del edificio
- Modificar el sistema estructural, mejorando la configuración y los elementos
- Adicionar nuevos elementos estructurales (por ejemplo, nuevas dadas de cerramiento sobre los muros)
- Modificar local o globalmente los elementos con y sin daño
- Reemplazar los elementos inadecuados o severamente dañados
- Redistribuir los efectos de las acciones (por ejemplo, renivelando una estructura)
- Colocar elementos de control
- Demoler total o parcialmente la estructura.

4.2.- Técnicas de rehabilitación.

Este apartado presenta las diferentes técnicas de rehabilitación aplicables a muros de mampostería. Se discuten las distintas modalidades de conexión entre la mampostería existente y los nuevos elementos de concreto, acero o mampostería; el reemplazo de piezas y de elementos dañados; la reparación de grietas; la

inserción de barras de refuerzo; el encamisado de muros; y la adición de elementos de concreto reforzado.

En la figura 4.1 se muestra, de manera específica, la relación entre el desempeño que ha exhibido la estructura por rehabilitar, el nivel de daño esperado y los esquemas de rehabilitación que pueden ser aplicados. La gráfica es técnicamente aplicable a muros de mampostería confinada, pero con modificaciones menores se puede usar para otras modalidades de mampostería.

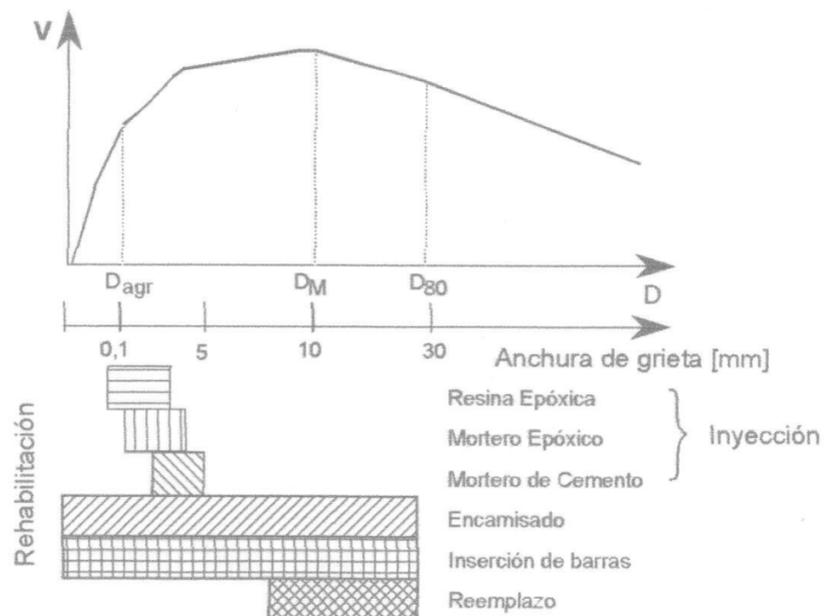


Figura 4.1.- Desempeño de un muro de mampostería existente, nivel de daño esperado y posibles esquemas de rehabilitación. (Edificaciones de mampostería para vivienda, 2003)

4.2.1.- Conexión de nuevos elementos a la mampostería existente.

Uno de los objetivos usuales de una rehabilitación es promover o asegurar un comportamiento monolítico entre los muros existentes y los materiales/elementos nuevos. Para lograr lo anterior es esencial que se preste atención a las conexiones locales.

4.2.1.1.- Anclas.

Es frecuente que se usen anclas o conectores para facilitar la conexión entre elementos de acero o de concreto a la mampostería existente. Las dos técnicas más comunes usan *conectores adhesivos* o *anclas mecánicas*. Para ambos tipos, la conexión resultante depende de los procedimientos de instalación y de la selección de los materiales.

Para instalar los conectores adhesivos, o de tipo químico, se barrena el muro y se limpia el agujero, se rellena éste con resina (epóxica, viniléster o poliéster) y se introduce el conector. Los ensayos que realizaron Luke y otros (1985) demostraron que el desempeño del anclaje se afecta por el procedimiento de limpieza. Lo esencial es que antes de la inyección de la resina, el barreno esté libre de aceite, polvo o partículas finas de las piezas de mampostería. No se recomienda retirar el polvo del barreno con aire comprimido, ya que el aceite que quede atrapado puede contaminar el agujero.

Existen en el mercado taladros con bombas de vacío o succión que usan brocas huecas, a través de las cuales se aspira el polvo mientras se perfora permitiendo el paso de la resina desde el fondo del barreno hacia la superficie. Un aspecto importante para el comportamiento del ancla es el mezclado de los componentes adhesivos. Algunos fabricantes ofrecen herramientas o dispositivos para facilitar el mezclado, pero es mejor utilizar cartuchos con los componentes adhesivos ya pesados y preparados, ya que evitan las básculas de alta precisión en la obra.

Un punto importante es la compatibilidad del adhesivo con la mampostería existente y con las condiciones ambientales esperadas (instalaciones en climas fríos o calientes, presencia de humedad, entre otras). Se propone la ejecución de ensayos a tensión en el sitio llevando a las anclas a cargas cercanas al 40 ó 50 por ciento de la carga de diseño para obtener un índice de la calidad de la limpieza del barreno.

Los conectores mecánicos suelen ser de tres tipos: *de expansión*, *de campana* y *de percusión*. Los *conectores de expansión* transmiten la carga mediante fricción contra la pared lateral del agujero; los de *campana* transmiten la carga mediante trabazón mecánica del conector y la mampostería justo en la base del conector. Los de *percusión* trabajan a fricción y son instalados con herramientas especiales accionadas con cargas explosivas controladas. Existen ciertas reservas sobre el uso de conectores mecánicos de expansión y campana

en aplicaciones sísmicas, en particular porque las recomendaciones de los fabricantes se basan, generalmente, en resultados de pruebas monótonas.

Collins (1989) halló que ante cargas impulsivas de tensión, los conectores mecánicos exhiben una degradación de rigidez debido a un mayor deslizamiento. Así, cuando se prevea el desarrollo de deslizamientos, es preferible el uso de conectores adhesivos sobre los mecánicos.

4.2.1.2.- Conexiones mampostería-acero.

El método más popular para conectar elementos de acero a la mampostería es mediante *conectores roscados* instalados en barrenos con algún tipo de resina. La conexión puede postensarse, de modo que la carga se transmita por fricción en la interfaz mampostería-acero. Los conectores roscados se instalan conforme a las mismas recomendaciones que las anclas antes mencionadas. “Es recomendable aplicar resina en la cara del elemento de acero en contacto con la mampostería, para mejorar la resistencia y rigidez de la conexión, así como en el espacio anular que queda entre el perno y el agujero en el acero” (Weiner, 1985). La resina colocada en el elemento de acero promueve una distribución más uniforme de carga entre los pernos, y la que queda en el espacio anular, reduce o elimina los problemas de esfuerzos excesivos en el contacto entre el perno y el elemento de acero. Si para garantizar un comportamiento adecuado se necesita una conexión rígida, se recomienda usar rondanas de presión para mantener la

fuerza de sujeción del perno que, de lo contrario, se perdería por relajación del conector (Jiménez, 1992). Si, por otro lado, se requiere que la conexión posea una elevada capacidad de deformación, se deben usar mayores espacios anulares (mayores que 1,5 mm) y una capa de mortero entre el elemento de acero y la mampostería. Sin embargo, se debe considerar las posibles reducciones en resistencia e incrementos en la degradación de rigidez en este tipo de conexiones.

Los elementos de acero se pueden fijar a la mampostería mediante conexiones de fricción, en las cuales es usual practicar llaves de corte para mejorar la transferencia de carga. La otra modalidad mencionada, que puede usarse en combinación con la anterior, es postensar el elemento de acero a la estructura existente.

4.2.2.- Reemplazo de piezas y de concreto dañados.

Esta técnica por lo regular se aplica en muros con zonas muy dañadas; dependiendo de su eficiencia, de la calidad y de su ejecución. Generalmente se aplica combinando alguna de las técnicas señaladas anteriormente. Para el correcto reemplazo, es necesario apuntalar y renivelar la estructura, así como el uso de morteros o concreto con aditivos estabilizadores de volumen. Posteriormente se pretende disminuir la contracción por fraguado y las fisuras que ocurren por las restricciones a la contracción.

La regla básica del reemplazo de piezas y de concreto dañados es el usar el mismo tipo de materiales, cuya resistencia sea al menos igual a la resistencia del material original. Es común que al reparar las zonas dañadas se pretenda mejorar la estructura mediante el uso de materiales con características mecánicas mayores a las existentes; por, ende es preciso señalar que al insertar estos materiales en vez de una mejoría será todo lo contrario desencadenando concentraciones de esfuerzos y al fin dañando la estructura.

La aplicación de esta técnica se recomienda cuando existe un daño severo en muros ante las acciones telúricas, las cuales se caracterizan por aplastamiento de piezas a lo largo de las grietas inclinadas, así como por aplastamiento y desconchamiento del concreto de los elementos confinantes (Ruiz, 1995). En específico, si están dañados los castillos, y se decide rehabilitar la estructura, es necesario apuntalar el edificio, ya que como menciona Alcocer (1997), los castillos no sólo contribuyen a incrementar notablemente la capacidad de desplazamiento lateral de la estructura y a dar estabilidad a su comportamiento, sino que participan en la capacidad de carga vertical de modo determinante.

4.2.3.- Reparación de las grietas.

La prueba clara de daño en un muro de mampostería es su agrietamiento. La reparación de las grietas consiste, en cerrarlas o rellenarlas con materiales similares o diferentes de la mampostería original. Hay dos tipos de reparación: inyección y *rajuelo*.

En todos los casos, se debe retirar el aplanado de la zona de la grieta, cuando menos en los 30 cm contiguos. En el primer caso, las grietas se rellenan mediante la inyección de resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento (con consistencia de lechada). Esta técnica se aplica en muros con bajo número de grietas bien definidas; como en el caso de muros sin refuerzo horizontal (o sin mallas) o con baja cuantía de refuerzo horizontal y vertical.

La inyección de grietas es una manera viable de mantener la funcionalidad del edificio, incrementando su seguridad, así como su durabilidad, pero sin alterar su estética.

4.2.3.1.- Inyección de resinas y morteros epóxicos.

El aspecto primordial de la resina debe ser viscoso para lograr la penetración completa en la grieta. La viscosidad está en función de la anchura de las grietas; indudablemente, mientras mayor sea la anchura de la grieta, mayor será la viscosidad. Las resinas poseen altas resistencias a la tensión (30 a 50 MPa) y a la adherencia con las piezas, generando que las nuevas grietas que se formen sean paralelas a las existentes; es decir, no se abren las existentes. La anchura mínima para rellenar grietas a presión es de 0,05 mm, y por gravedad 0,30 mm. En caso de que las piezas tengan una alta absorción, conviene recurrir a resinas espumantes con aditivos estabilizadores de volumen.

El proceso de inyección en estructuras de mampostería es similar al que se sigue en estructuras de concreto reforzado como se muestra en la Fig. 4.2. No se recomienda inyectar por vacío dada la variabilidad que se obtiene en la penetración y rellenado de grieta.

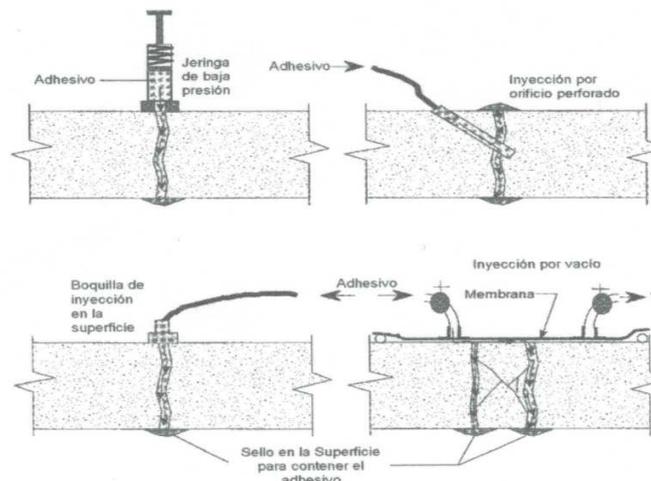


Figura 4.2.- Técnicas para inyección de resinas en concreto agrietado.

El proceso se inicia con la limpieza de las grietas, retirando todo residuo de polvo y de material flojo o suelto. No es recomendable usar agua para la limpieza, a menos que se evapore en su totalidad antes de inyectar el material epóxico. Lo anterior acata a que los materiales epóxicos no se adhieren a superficies húmedas. Es conveniente limpiar la grieta con aspiradora industrial; posteriormente, se sellan las grietas (generalmente con una pasta de viniléster o poliéster) y se colocan las boquillas de inyección (Fig. 4.3). Se recomienda que la separación de ellas a lo largo de la grieta sea de una vez el espesor del muro.

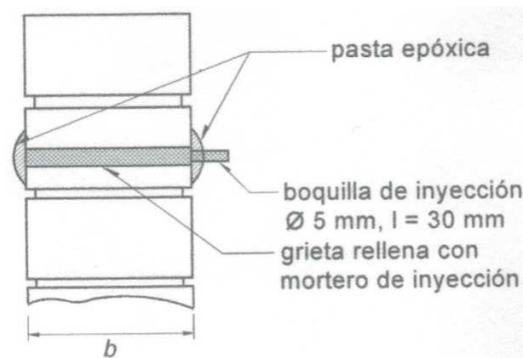


Figura 4.3.- Reparación de grietas en estructuras de mampostería mediante inyección.

La inyección a presión inyecta la resina de abajo hacia arriba a lo largo de la grieta. El proceso se considera como satisfactorio cuando la resina sale por la boquilla inmediata superior. Una vez que esto sucede, se cierra la boquilla y se procede con la siguiente superior de modo consecutivo. Una vez terminada la inyección de las grietas del muro, se puede retirar las boquillas y el sellador con calor. “Con esta técnica, si se ejecuta adecuadamente, se restituye entre el 70 y 90 por ciento de la resistencia, 30 a 80 por ciento de la rigidez y del 75 al 90 por ciento de la capacidad de deformación del muro original” (Hidalgo y otros, 1991).

4.2.3.2.- Inyección de morteros de cemento.

“Las lechadas o morteros fluidos de cemento deben ser inyectables, estables, resistentes y deben tener partículas pequeñas” (Atkinson y Schuller, 1993). Inyectable para facilitar su fluidez a través de grietas y vacíos; estables se refiere a que tenga baja segregación, sangrado controlado y una reducida

contracción plástica; resistentes para soportar esfuerzos de compresión y tensión y tengan adherencia con las piezas de mampostería. Si las lechadas se diseñan adecuadamente, se pueden inyectar grietas con anchuras de 0.08 mm hasta 12 mm o más.

Para su colocación, se debe barrenar el muro a lo largo de la grieta para colocar ahí las boquillas de inyección. Las boquillas deben estar separadas entre 70 y 300 mm; su separación dependerá de la anchura y rugosidad de la grieta. Si la anchura de las grietas es menor que 1 mm, se recomienda colocar las boquillas dentro de los barrenos y separarlas entre sí 70 mm. Los barrenos deben tener diámetros entre 6 y 12 mm, y una profundidad de 50 mm. Se recomienda usar sellador de silicón para fijar y sellar las boquillas al muro. Si las grietas son de mayor anchura, se pueden usar boquillas de superficie, que constan de una base metálica, que se adhiere al muro, y un tubo perpendicular (boquilla) que se conecta a la manguera.

Si el agrietamiento es por corte, es decir, sigue las juntas de mortero, se recomienda colocar boquillas a la mitad de la altura de las juntas verticales, ya que es menos probable ahí la presencia de finos o partículas que bloqueen el flujo de la lechada. Posteriormente, se limpia la grieta y los barrenos, retirando el polvo y material flojo o suelto con aspiradora. Después, se sellan las grietas con algún material de fraguado rápido y capaz de resistir la presión de inyección. Generalmente, se usa pasta de viniléster o poliéster. Las pastas a base de vinil poseen la desventaja de ser ligeramente solubles al agua, de modo que pueden

fugar durante la inyección. Posteriormente, se retiran las partículas de la grieta con agua a presión ($0,10 \text{ MPa} = 1 \text{ kg/cm}^2$), empezando desde la parte más alta. Se debe dejar que el agua fluya hasta que al salir de las boquillas esté libre de partículas.

Con este procedimiento se logra saturar el muro, para retrasar o evitar el fraguado prematuro de la lechada. Es conveniente practicar esta limpieza 24 h antes de la inyección; 30 minutos antes se debe aplicar un ligero flujo de agua. Con el objeto de evitar que la lechada se adhiera a las superficies del muro, es recomendable humedecerlas.

La lechada debe ser homogénea; se recomienda aplicar 3 500 rpm para deshacer los componentes en partículas individuales más pequeñas. El tiempo de mezclado depende del equipo empleado; generalmente, es del orden de 3 min con intervalos para remezclado de 5 min. Para verificar la fluidez de la mezcla, y que se apto para la inyección, se puede usar el viscosímetro de Marsh para lechadas muy fluidas, o bien el vaciado desde 30 cm en un material impermeable, de lechada contenida en un cilindro de 5 por 10 cm, para lechadas con arena. En este último caso, el diámetro de la lechada es un índice de su fluidez.

“La inyección se hace a presiones de $0,05$ a $0,1 \text{ MPa}$ ($0,5$ a 1 kg/cm^2) aunque la presión dependerá del nivel de daño en el muro y de la calidad de la mampostería” (Schuller y otros, 1994). Si se emplean altas presiones, es probable

que surjan burbujas de aire dentro de la lechada de modo que puedan provocar una rápida separación o filtrado de los sólidos al penetrar en la grieta.

Por ello se usa la presión más baja posible. La inyección debe hacerse de abajo hacia arriba, una vez que sale la lechada por la boquilla inmediata superior, conviene mantener la inyección por 30 segundos adicionales, para asegurar la compactación de la lechada.

Para evitar problemas de estabilidad estructural, se debe revisar que la presión hidrostática producto de la lechada inyectada no sea excesiva. Se recomienda iniciar con la inyección de las grietas de mayor anchura. Para inyectar, se usa un recipiente a presión que posea un regulador y un manómetro para verificar y mantener la presión de inyección señalada. La bomba de pistón debe contar con accesorios adecuados para conectar las mangueras a las boquillas de inyección.

Para un curado adecuado, se recomienda retirar el sellador de grietas cuando menos 24 h después de la inyección. Como se dijo, los selladores de vinilo son semisolubles al agua, lo cual facilita su retiro con agua y un cepillo de cerdas rígidas. Las pastas de resina epóxica se retiran con soplete y una cuña metálica. Se ha encontrado que si la relación agua/sólidos aumenta, mejora la penetración de la lechada en las grietas, pero se incrementa la segregación y el sangrado. La estabilidad de la lechada se puede mejorar si se usan aditivos superfluidizante o humo de sílice.

Se ha demostrado que los muros que han sido reparados mediante inyección de morteros de cemento han recuperado, e incluso mejorado, su resistencia (80 a 120 por ciento de recuperación), rigidez (50 a 100 por ciento) y capacidad de deformación (80 a 90 por ciento) con respecto a las propiedades originales. “La inyección de grietas y huecos con lechadas de cemento, en combinación con la colocación de tensores, han demostrado un excelente desempeño para reforzar parapetos de azotea y evitar su falla fuera de plano” (Klingner y otros, 1997).

4.2.3.3.- Reparación de grietas con rajuelas

Cuando la grieta tiene una anchura superior a 5 mm, resulta conveniente repararla con rajuelas, que son pedazos de piezas que se insertan en cajas abiertas en la grieta. Las rajuelas deben acuñarse debidamente y deben pegarse con mortero tipo I (Gobierno del Distrito Federal, 2002a). Antes de colocar el mortero, se debe limpiar y humedecer las superficies que estarán en contacto con el mismo. Es conveniente usar algún aditivo estabilizador de volumen en el mortero de pega, para controlar los cambios volumétricos y la contracción por fraguado que pueda sufrir.

4.2.4.- Inserción de barras de refuerzo.

Otra técnica de rehabilitación de muros de mampostería consiste en colocar barras de refuerzo a lo largo de las juntas de mortero. Para alojarlas, se requiere

preparar la junta con ranuras longitudinales y practicar barrenos transversales al muro a ciertos intervalos para amarrar a las barras entre sí (Fig. 4.4).

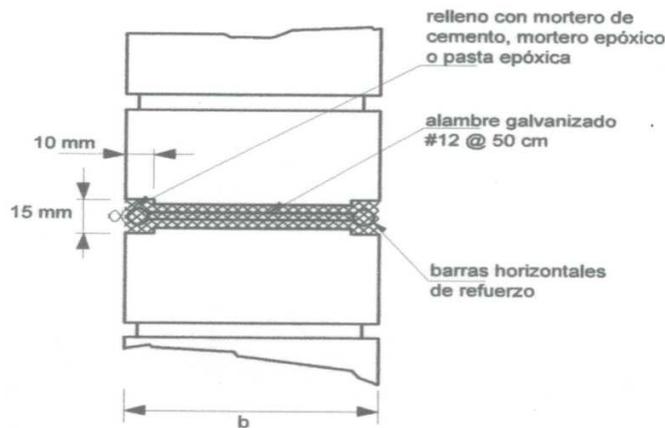


Figura 4.4.- Ejemplo de inserción de barras de refuerzo en las juntas de un muro

Una vez colocadas las barras, generalmente una en cada lado del muro, se recubren con mortero de cemento o tipo epóxico. Las barras se deben anclar en los extremos de los muros, preferentemente mediante ganchos estándar a 90° en los elementos confinantes, si existen. La manera de estimar la contribución de las barras a la resistencia del muro está establecida en las NTCM (GDF, 2002a).

Aunque con esta técnica se alcancen recuperaciones aceptables de resistencia, rigidez y capacidad de deformación, su desempeño es altamente dependiente de la calidad de la ejecución. Se recomienda evaluar con cuidado la idoneidad de usar esta técnica según la condición del sitio, y de la mano de obra y supervisión de la localidad.

Otra alternativa de reparación es engrapar las fisuras del muro (San Bartolomé, 1990). Este método es práctico si el número de grietas es pequeño. Consiste en alojar barras de refuerzo con ganchos a 90° en sus extremos (de forma de una grapa para papel) en sendas ranuras y barrenos practicados en el muro (Fig. 4.5).

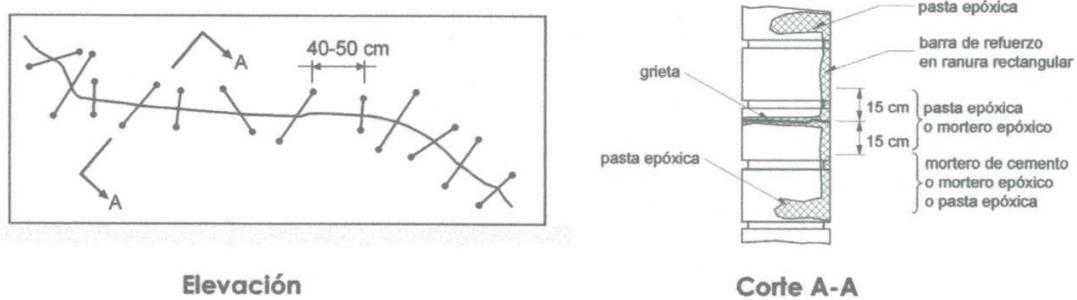


Figura 4.5.- Colocación de grapas sobre grietas en muros de mampostería.

Las ranuras y barrenos se rellenan con mortero de cemento o, de preferencia, epóxico. Las grapas se deben colocar ortogonalmente a la grieta de modo que resistan las tensiones que se producen cuando la grieta tiende a abrirse. Resultados de laboratorio han indicado un pobre comportamiento ante sismo de muros reparados con grapas debido al pandeo de las grapas inclinadas cuando el sentido de aplicación de la acción se invierte y las grapas tienen que trabajar a compresión. Sin embargo, su desempeño ante acciones monótonas ha sido satisfactorio. Esta técnica es bastante popular para restaurar monumentos históricos.

4.2.5.- Encamisado de muros.

Los muros se pueden rehabilitar adosando mallas metálicas al muro y recubriéndolas con mortero de cemento colocado a mano o bien lanzado. Además, se pueden encamisar con ferrocemento, con un aplanado de concreto lanzado con fibras metálicas o con materiales sintéticos. Aunque los encamisados de ferrocemento se han sugerido como una opción, no existe información suficiente sobre su desempeño, de modo que no se discutirá este tema.

Una desventaja del encamisado de muros es la modificación de la apariencia de la estructura, lo cual puede ser determinante si el edificio posee un valor histórico o estético sobresaliente.

4.2.5.1.- Encamisado con mallas metálicas.

El término encamisado se refiere al aumento de la sección transversal del elemento estructural mediante la colocación de una capa de concreto, mortero o material similar, reforzado con barras de acero convencionales, mallas de alambre electrosoldadas, mallas o bandas sintéticas u otras. Es común que cuando se emplean bandas sintéticas no se emplee material de recubrimiento.

Sin duda, la técnica de colocación de mallas metálicas, es la más confiable, eficiente y económica, preferentemente electrosoldadas o hechas con barras convencionales, adecuadamente ancladas a los muros y recubiertas con 30 mm o más de mortero o concreto lanzado. Con esta técnica se pueden esperar

incrementos en resistencia, rigidez y capacidad de deformación originales superiores al 50, 20 y 100 por ciento, respectivamente. Además, el aumento de la resistencia a carga lateral debido a la malla conduce a que el costo por unidad de carga resistida sea menor que en muros confinados con o sin refuerzo horizontal. La técnica se ha usado cuantiosamente en varios países del mundo (Figura 4.6).



Figura 4.6.- Encamisado con mallas metálicas.

4.2.5.1.1.- Pruebas a muros de mampostería con aberturas y rehabilitación con malla y mortero.

Se puede reconstruir parcialmente una construcción o cambiar su resistencia mediante la suma de nuevos elementos estructurales, pero la mayoría de la población no cuenta con los recursos para afrontar reparaciones costosas a su vivienda tras ocurrir un desastre, por ello se necesitan técnicas de refuerzo eficientes, de costo mínimo y fácil aplicación.

La técnica de rehabilitación con malla y mortero es la más usada en el medio, relativamente es fácil de aplicar, no requiere de supervisión especializada y sobre todo es económica; además de que esta técnica a parte de restituir la capacidad original de la estructura, aporta mayor nivel de seguridad.

Así mismo se ha estudiado ampliamente el esta técnica mediante ensayos en laboratorio, verificando el comportamiento de los muros con aberturas y el detallado de la rehabilitación, mismo que es requisito en las nuevas normas técnicas complementarias para el diseño de estructuras de mampostería (NTCM) del reglamento de construcciones para el Distrito Federal (GDF 2004) (Fig.4.7).

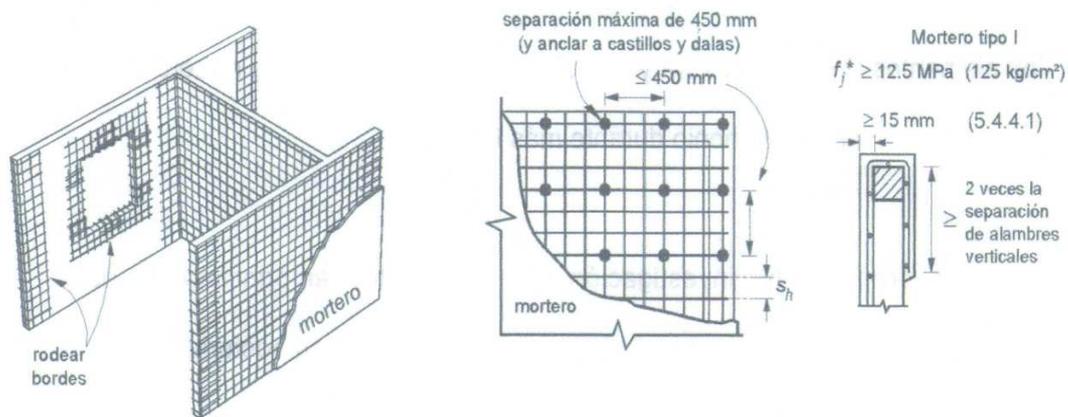


Figura 4.7.- Requisitos para uso de malla y mortero (GDF, 2004).

En un estudio realizado por CENAPRED, se analizaron dos muros de 3.15m de longitud y 2.5m de altura, construidos con mampostería de piezas macizas de arcilla recocida y confinados en sus extremos por castillos; ambos contaban con una abertura (ventana) el centro. El primer espécimen MV-1R, no contaba con refuerzo alrededor de la abertura, mientras que el segundo espécimen MV-2R, contaba con castillos y dalas en la abertura.

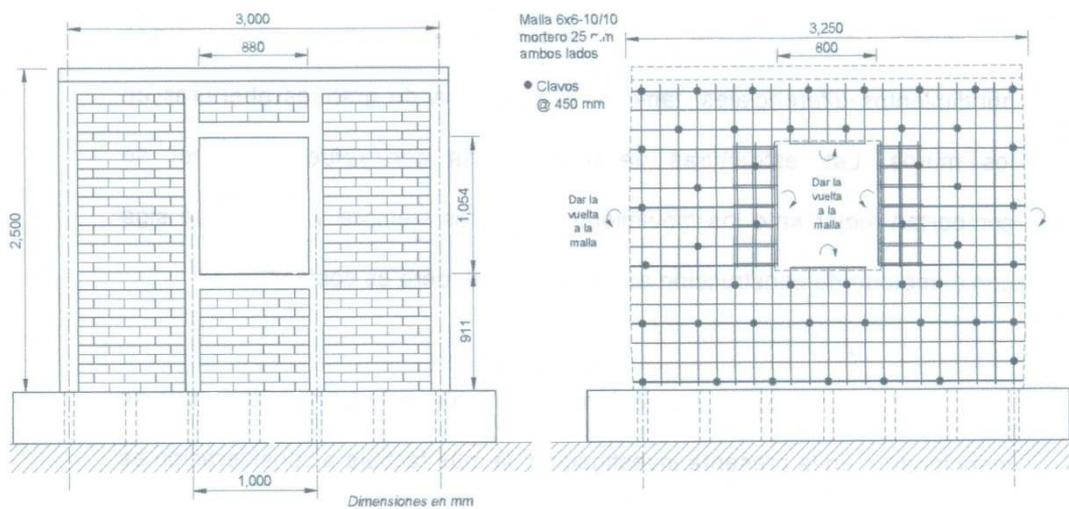


Figura 4.8.- Dimensiones generales de los modelos. a) Modelo original del MV-2R, b) Malla y posición de los conectores.

Los muros se sometieron a cargas laterales cíclicas reversibles mediante un gato hidráulico a la altura de la losa, llevándolos a un nivel de daño severo, con agrietamientos diagonales entre las esquinas de las ventanas y los extremos de los castillos laterales. El ancho de las grietas varió entre 10 y 20 mm en la mampostería y en los castillos desde 5mm hasta el desconchamiento completo de la zona dañada (Fig.4.9).

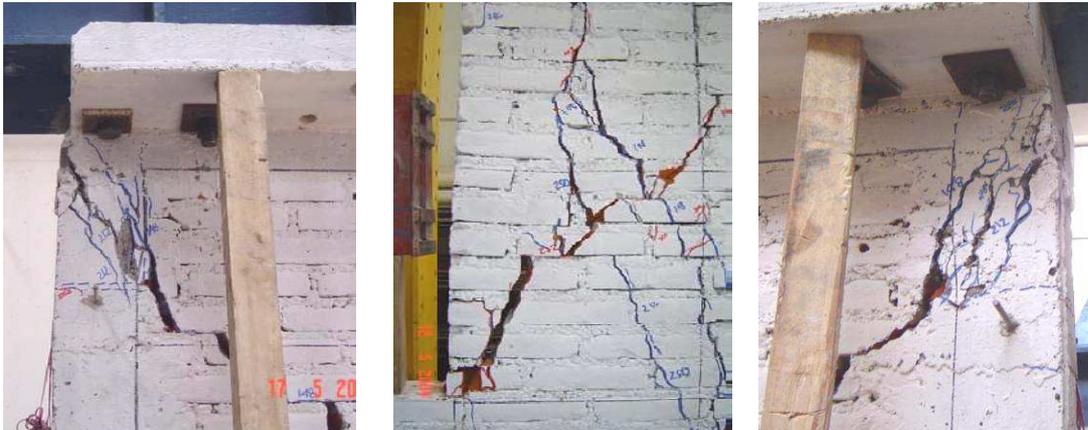


Figura 4.9.- Daño en castillos y en el panel de mampostería.

El procedimiento de rehabilitación siguió los siguientes pasos:

- 1) Apuntalamiento de la losa.
- 2) Demolición y nuevo colado del concreto de la zona dañada de los castillos. La demolición se realizó reparando un castillo antes de reparar el otro.
- 3) Se reemplazaron las piezas de mampostería que se encontraban totalmente fracturadas, principalmente en los segmentos del muro donde se cruzaron los agrietamientos diagonales primordialmente en forma de "X" y en las esquinas de la ventana en el modelo MV-1R.
- 4) Relleno de grietas de más de 3mm de anchura, usando mortero fino de concreto y arena cernida.
- 5) Limpieza del muro eliminando la pintura.
- 6) Colocación de la malla y fijación al muro con clavos para concreto de 50mm a cada 450mm, sujetado la malla con alambre recocido. Se dio la vuelta con la malla en los extremos laterales del muro y a la abertura. El

traslape de malla fue de 300mm (dos cuadros de la misma). Este refuerzo se colocó en ambas caras del muro.

- 7) Aplicación del recubrimiento de mortero cemento-cal-arena de 25mm de espesor. Los elementos de concreto (castillos y dalas) se “picaron” para una mejor adherencia del mortero.

En la figura 4.10 se muestran distintas etapas de la reparación de los especímenes.

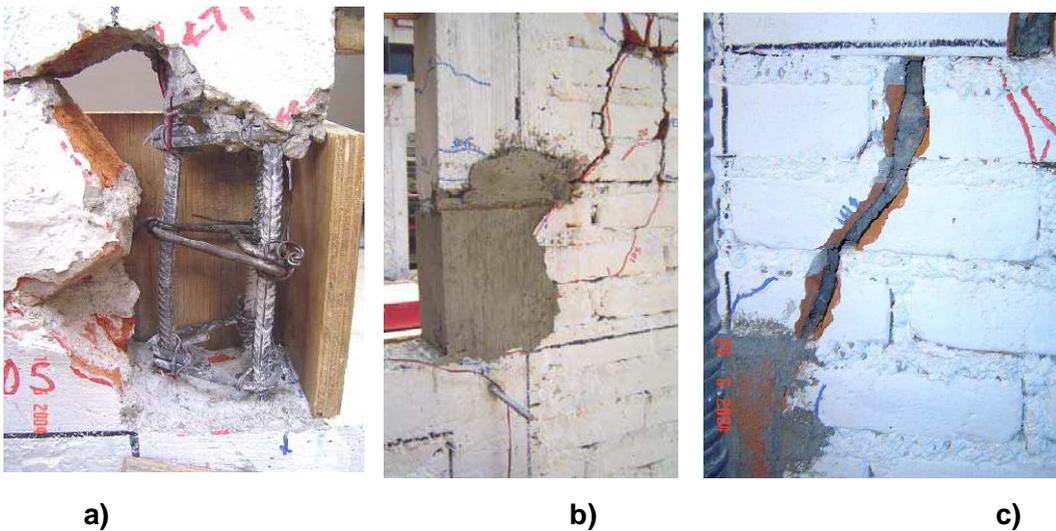


Figura 4.10.- Proceso de reparación a) demolición de extremo de castillo, b) colado de castillos, c) relleno de grietas.

Después de la rehabilitación de los especímenes se sometieron a nuevas cargas las cuales se consideraron en tres etapas de comportamiento; una etapa elástica lineal hasta el primer agrietamiento, la siguiente etapa plástica con pérdida de la rigidez, incrementando el agrietamiento y la resistencia hasta la

carga máxima; y la última la etapa de falla presentándose la fractura de los alambres de la malla.

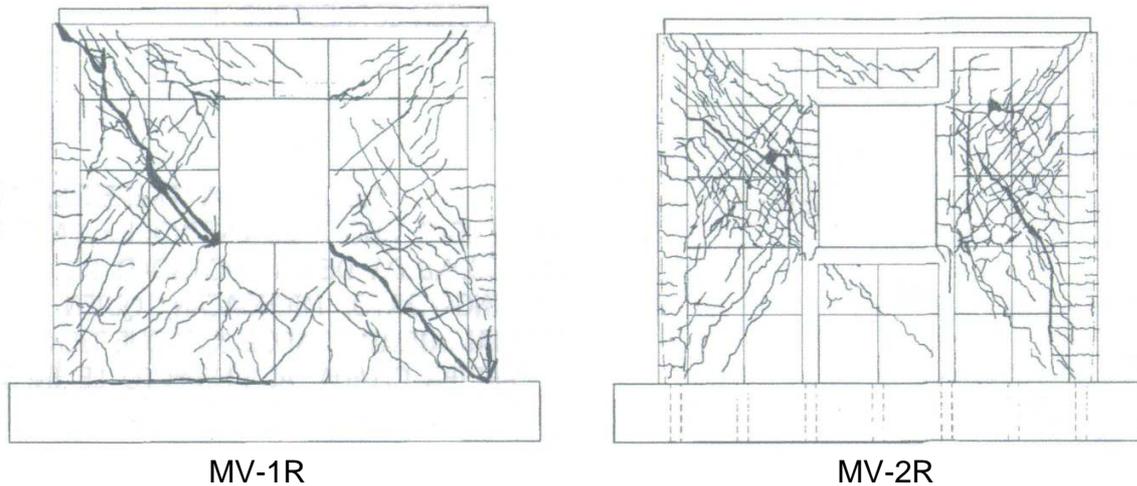


Fig. 4.11.- Patrón final de daño en los especímenes rehabilitados.

La figura 4.11 muestra el comportamiento final de los muros rehabilitados con malla, además se muestra una mejor distribución de las grietas a diferencia de los especímenes originales. Son notables en el modelo MV-2R las grietas a comparación del MV-1R, sólo se ubicaron a los lados de la ventana del muro.

El refuerzo con castillos en la ventana evitó que aparecieran grietas en las esquinas inferiores de la misma, incluso evitó la repentina falla del muro del modelo MV1-R, comparado con el modelo MV-2R que presentó por más tiempo su integridad. El agrietamiento en los paneles abajo y arriba de la ventana evidencian que estas zonas también trabajaron. En la figura 4.12 se observa el comportamiento de los dos modelos antes y después de su rehabilitación, así como la estimación teórica según las NTCM (2004).

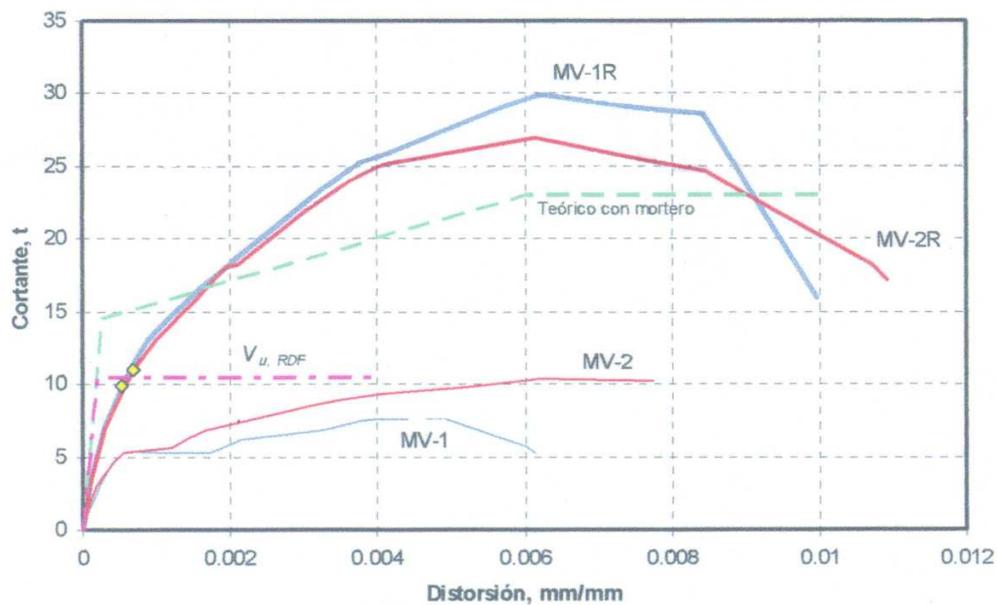


Figura 4.12.- Envolturas de respuesta (CENAPRED).

Se esperaba que el espécimen con castillos en la abertura presentara igual o mayor resistencia, soportando una carga menor que el muro que no los tenía. Ello se debió a ligeras diferencias en las resistencias del mortero y el espesor de los aplanados; en general se considera equivalentes las envolturas de los modelos ya que en promedio alcanzaron tres veces la resistencia de los muros originales.

Por lo anterior, es recomendable el uso de esta técnica con fines de rehabilitación, igualmente se puede aplicar a muros con aberturas que no cuentan con refuerzo (castillos y dalas), haciendo énfasis que al reforzar cualquier estructura se debe diseñar un esquema que evite asimetrías e irregularidades en

planta y elevación, seleccionando los muros a rehabilitar aunque algunos no estén dañados.

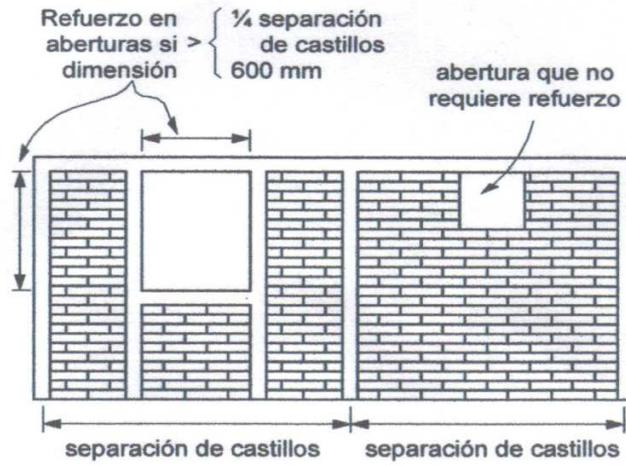
4.2.5.2.- Técnicas habituales de rehabilitación.

Se pretende considerar las formas de rehabilitación más usuales para las estructuras de mampostería de adobe, no confinada y confinada, siendo éstas las edificaciones más tradicionales que se encuentran en las zonas sísmicas de México.

Para las edificaciones de adobe, se debe mejorar la liga entre los muros por medio de algún refuerzo que produzca una liga adecuada entre los elementos y proporcione confinamiento y ductilidad a los muros.

Las principales técnicas de rehabilitación es la construcción de dalas de concreto reforzado con dentellones en esquinas, la construcción de dalas y castillos de concreto como en las estructuras de mampostería confinada y el uso de malla de alambre y recubrimiento de mortero ya sea en todo el muro o en bandas colocadas en los bordes y esquinas, ello también es apto para el uso en la mampostería no confinada.

Para la mampostería confinada es simple seguir con los requerimientos de construcción como son: castillos y dalas con una dimensión mínima respecto al espesor del muro y colocados en extremos, en las intercepciones de muros y a una distancia máxima en la Fig.4.7 se representan gráficamente.



4.7.- Requisitos de refuerzo en el perímetro de aberturas (GDF, 2002).

A pesar de que dichos tipos de construcciones se realiza por autoconstrucción, es necesario que se difunda los resultados de estas técnicas de rehabilitación, a través de guías y de fácil aplicación evitando que los conocimientos se queden en el ámbito académico.

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se trata el enfoque y el tipo de la actual investigación, así como el análisis del alcance de la misma dando como resultado una investigación de alcance descriptivo y transversal, destacando el momento del estudio en tiempos vigentes.

5.1.- Enfoque.

Como Hernández (2008) menciona, el enfoque de esta investigación es del tipo mixto, ya que en el proceso de dicha investigación se combina lo cualitativo y cuantitativo, este modelo es complejo por ello es necesario contar con una mentalidad abierta, así mismo se agrega una complejidad al diseño de estudio coadyuvando a conocer todas las prerrogativas de ambos enfoques.

A continuación se detallarán las características principales de los dos tipos de enfoque:

El *enfoque cuantitativo*: Recopila datos para probar hipótesis, en base a la medición numérica y el análisis estadístico, estableciendo patrones de comportamiento y posteriormente probar teorías.

El *enfoque cualitativo*: Se basa en un esquema inductivo, expansivo y no mide numéricamente los fenómenos en estudio, más bien las preguntas de investigación surgen durante el desarrollo del estudio.

En el actual estudio la investigación es mixta ya que ofrece diversas posibilidades de analizar los daños generados en edificaciones de mampostería después de un sismo como son las grietas principalmente que se presentan en los muros, y posteriormente a su rehabilitación bajo diversas técnicas.

5.2.- Alcance.

El alcance de esta investigación es de tipo descriptiva, el cual “se basa en la medición de uno o más atributos del fenómeno descrito” y en la “recolección de datos sobre éste y su contexto” (Hernández; 2008:120); ambos aspectos por ser una investigación mixta como se menciono anteriormente.

“La investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice” (Hernández; 2008:119). Además, la investigación descriptiva tiene la eventualidad de ofrecer predicciones en relación de lo establecido con la mezcla de nuevos factores.

Así, se indujo que esta investigación es de tipo descriptiva, ya que los datos muestran los daños que se generan en los muros de mampostería después de movimientos telúricos, lo cual se analizan dichos daños para posteriormente concluyendo con su rehabilitación.

5.3.- Tipo de diseño.

El tipo de diseño de esta investigación es *no experimental* en base a Hernández (2008). Es decir, la información no experimental analiza, evalúa, y determina las diferentes variables en un momento dado.

En un estudio de esta índole no se construye ninguna situación, ya que las variables son independientes y al observar las situaciones existentes, éstas no pueden ser alteradas por quien realiza la investigación por el hecho de que ya ocurrieron.

Dado a lo anterior, en la presente investigación no se lleva a cabo ningún experimento físico, ya que solo se estudia la mampostería por medio de información documental.

5.3.1.- Estudio transversal.

El diseño de investigación transversal o también llamada transeccional, es la recolección de datos en un tiempo actual.

“El propósito es describir variables analizando su incidencia y la relación que hay entre ellos pero solo en un momento dado” (Hernández,2088:270).

La información que se presenta en esta investigación al lector es de tipo transversal, ya que los resultados de dicha investigación arrojan que los diversas formas de análisis y tipos rehabilitación son las más usadas hasta al momento.

5.4.- Instrumentos de recopilación de datos.

La información que se recabo durante la investigación fue a través de diversas fuentes bibliográficas destacando las Normas Técnicas Complementarias para Mampostería (NTCM) de las cuales se retomaron datos de los tipos de piezas que se utilizan en la mampostería así como la resistencia de las mismas; de igual manera se consideraron criterios de diseño de estructuras de mampostería en zonas sísmicas.

Además, se consideraron varias obras literarias para desglosar lo que es un sismo, cómo se origina y porque es tan importante saber cómo afectan las fuerzas de éstos en las viviendas de mampostería.

5.4.1.- Observación.

Otra forma de recolectar datos para esta investigación fue a través del método de la observación que es *cualitativa o de campo*; cuyo propósito de ésta es captar, explorar, describir, comprender el medio en que suceden los eventos.

De lo anterior, se realizo investigación de campo observando algunas edificaciones que presentaran algunas grietas y/o fisuras.

Así mismo, esta investigación se puede considerar que cuenta con un poco de la observación cuantitativa, por el hecho de referir las grietas o fisuras en una medición.

5.5.- Descripción del proceso de investigación.

La recopilación de datos de esta investigación se llevo a cabo primeramente sintetizando toda la información sobre qué es la mampostería, cuáles son los elementos que la componen, cuál son sus propiedades físicas, su resistencia promedio, de aquí la importancia de la bibliografía de las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería.

Del mismo modo se investigo qué son los sismos, qué los origina, dónde se presentan con mayor frecuencia acerca del comportamiento de la mampostería tradicional ante movimientos telúricos, etc. Posteriormente se averiguo sobre el análisis de mampostería dañada por sismos mediante instrumentos que miden el deterioro de los elementos estructurales, cual o cuales con los más confiables, así mismo, si es posible o no rehabilitar la mampostería después de un sismo.

5.6.- Análisis e interpretación de resultados.

En esta investigación se realizaron evaluaciones a algunas viviendas de mampostería principalmente de piezas macizas, las cuales han sido dañadas por movimientos telúricos, presentando fisuras y grietas, además estudiaron los métodos más apropiado de restauración para dichas edificaciones.

De lo anterior se estipulo que para grietas menores de 3 mm de ancho, no es necesario rellenarlas puesto que dañaría más el muro. Por el contrario, las

grietas mayores a 3mm es conveniente que se rellenen con pastas finas a base de mortero cemento y arena cernida en proporción 1:3.

De igual forma se consideró que el método de rehabilitación más factible para las edificaciones de mampostería dañadas por los sismos, es la colocación de malla electrosoldada y recubrimiento de mortero, pues se ha demostrado mediante estudios de laboratorio así como en la práctica que es el método que aumenta la rigidez, resistencia y capacidad de deformación de los muros e incluso hasta dos veces su resistencia original, al mismo tiempo que es económico a comparación con otros métodos.

De tal forma, se recomienda que el uso de esta técnica sea con fines de rehabilitación, igualmente se puede aplicar a muros con aberturas que no cuentan con refuerzo (castillos y dadas). No obstante, al reforzar cualquier estructura es preciso diseñar un esquema que evite asimetrías e irregularidades en planta y elevación, seleccionando los muros a rehabilitar aunque algunos no estén dañados.

CONCLUSIONES.

En esta investigación se logró recabar suficiente información para conocer el comportamiento de las edificaciones de mampostería después de un sismo, para después estipular los métodos de evaluación así como la restauración estructural de mampostería dañada por los movimientos telúricos.

Se observó que dado que la mampostería es uno de los métodos de construcción más arraigado en todo México, es importante conocer si es viable la restauración de los inmuebles mediante un adecuado análisis para revisar la resistencia de los elementos de mampostería y de existir riesgo de colapso se refuercen y se pueda conservar el patrimonio durante más tiempo.

Se dedujo primero que el comportamiento de las estructuras de mampostería de adobe son más vulnerables vibraciones moderadas o intensas ya que en las aberturas se presentan grietas por no contar con elementos de cierre, también la debilidad de las piezas a tensión y los muros tienden al volteo. De tal manera las estructuras de mampostería sin refuerzo se presentan grietas de forma inclinada, en escalera y en el centro del muro y esquinas por la tendencia a volteo, ello resultado del uso de castillos de concreto sin ligamiento al muro de mampostería.

Sin embargo las edificaciones de mampostería confinada su deficiencia es a través de las densidades de los muros ocasionando hundimientos diferenciales, también la existencia de grandes aberturas en los muros. Las estructuras de mampostería con refuerzo interior se comportan mejor ante los movimientos telúricos siempre y cuando se siga con el método de construcción adecuadamente, pero es costoso.

De los métodos de evaluación de estructuras de mampostería que se mencionaron en la presente investigación, la más factible a consideración es la *Termografía de rayos infrarrojos*, ya que evalúa a distancia, es decir, no se requiere acceso al elemento y se puede estudiar la estructura completa; localizando grietas, desprendimientos, huecos en muros de piezas macizas en mampostería, acero de refuerzo, y áreas en donde el mortero no penetró en muros de bloques de concreto rellenos.

Después de llevar a cabo el análisis y se pretenda restaurar muros de mampostería sigue el determinar el método de rehabilitación adecuado, el cual, es el de colocar dadas y castillos de concreto armado en muros de adobe y no confinados, igualmente se sugiere el encamisado con malla electrosoldada ya que no es muy costoso y su trabajo como acero de refuerzo es bueno.

La realización de esta investigación es con el propósito de restaurar viviendas que han sido dañadas por movimientos telúricos, con el fin de prevenir pérdidas tanto humanas como materiales.

BIBLIOGRAFÍA

Alcocer S.M., Sánchez T.A., Vázquez del Mercado R. y Díaz R.R. (1994), "Comportamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería confinada con distintos tipos de refuerzo horizontal", Centro Nacional de prevención de Desastres, México.

Alcocer S.M., Ruiz J., Pineda J.A. y Zepeda J.A. (1996), "Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh", Acapulco, Gro., México.

Atkinson R.H. y Schuller M.P. (1993) "Evaluation of injectable cementitious grouts for repair and retrofit of masonry", *Masonry - Design and Construction, Problems and Repair*, American Society for Testing and Materials, STP 1180.

Collins D. (1989), "Load-deflection behavior of cast-in-place and retrofit concrete anchors subjected to static, fatigue and impact tensile loads", Universidad de Texas, Austin, E.U.

Fundación ICA, A.C. (2003), "Edificaciones de mampostería para vivienda", 3° Edición, México.

Gallo Ortíz, Gabriel O., Espino Márquez, Luis I., Olvera Montes, Alfonso E. (2005) "Diseño estructural de casas habitación" 2° Edición, México, Mc Graw-Hill.

Hidalgo P., Lüders C. y de la Llera J.C. (1991), "Diseño y recuperación de edificios estructuras con muros", *Informe DIE 91-2*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

Instituto de Ingeniería (1992), "Comentarios y ejemplos de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, UNAM, D.F, México.

Meli R. (1990), "Diseño sísmico de edificios de muros de mampostería. La práctica actual y el comportamiento observado", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.

Mendoza C.J. (1991), "Evaluación de la resistencia del concreto en la estructura por medio del ensaye de corazones", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Vol. III.

ONNCCE (2002), "Anteproyecto de Norma Mexicana para la determinación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro y de concreto", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México.

Prado Nuñez, Ricardo (2000) "Procedimientos de restauración y materiales" 1° Edición, Ed. Trillas, México.

Rodríguez M. y Castrillón E. (1995), "Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

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", *Ingeniería Sísmica*, Vol. II, Veracruz, Ver., México.

Ruiz J. (1995), "Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural", Facultad de Ingeniería, UNAM, D.F, México.

Sánchez T.A., Flores L., Alcocer S.M. y Meli R. (1992), "Respuesta sísmica de muros de mampostería confinada con diferentes tipos de refuerzo horizontal", Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

Sánchez T.A. (1998), "Comportamiento de estructuras de mampostería confinada sujetas a cargas laterales", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Weiner D. (1985), "Behavior of steel to concrete connections used to strengthen existing structures", *Tesis de maestría*, Universidad de Texas, Austin, E.U.

HEMEROGRAFÍA

Khalaf F.M., y Wilson J.G. (1999), "Strength assessment of clay bricks using porosity dependent techniques", Vol. 17.

Bois, K.J., Campbell, H., Benally, A., Nowak, P.S. y Zoughi R. (1998), "Microwave noninvasive detection of grout in masonry", Vol. 16.

Luke P., Chon G. y Jirsa J.O. (1985), "Use of epoxies for grouting reinforcing bar dowels in concrete", *Informe PMFSEL No. 85-2*, Universidad de Texas en Austin, E.U.

Ruiz J. y Alcocer S.M. (1999), "Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de malla de alambre", *Revista de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Suprenant B.A. y Schuller M.P. (1994) "Nondestructive evaluation & testing of masonry structures", *The Aberdeen Group*, Addison, Illinois.

OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN

Enciclopedia Encarta Premium 2009

Enciclopedia Encarta MR. 2009

[Http://Www.lmcyc.com/cyt/octubre02/conservar.htm](http://www.lmcyc.com/cyt/octubre02/conservar.htm)

[Http://Www.inah.gob.mx/core/htme/core007010402.html](http://www.inah.gob.mx/core/htme/core007010402.html)

[Http://Seismo.ethz.ch/gshap](http://Seismo.ethz.ch/gshap)