



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**CAMPUS ARAGÓN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO**

**TECNICAS DE REHABILITACION EN MUROS  
DE MAMPOSTERIA FABRICADOS CON  
PIEDRAS ARTIFICIALES**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A:**

**FERNANDO CAMACHO MENDOZA**

**ASESOR: ING. ARTURO MACIAS FERREIRA**

**SAN JUAN DE ARAGON, ESTADO DE MÉXICO**

**2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## **DEDICATORIAS**

**A LA MEMORIA DE MIS PADRES:**

**LUZ MENDOZA VARGAS  
RUBEN CAMACHO VALDEZ**

**A MI ESPOSA GABRIELA; A MIS HIJOS CRISTIAN, ARISBETH Y MI  
PEQUEÑA LUZ FERNANDA.**

**A TODOS MIS HERMANOS Y AMIGOS:  
DE MANERA MUY ESPECIAL A MI CUÑADO LUCIO TOVAR T. Y A MI  
HERMANA ANGELA, POR INFINITO APOYO QUE SIEMPRE ME HAN  
PRESTADO.**

**A MI DIRECTOR DE TESIS, EL ING. ARTURO MACIAS FERRERIRA, POR SU  
APOYO Y AMISTAD.**

**A MI AMIGO ISIDRO LOPEZ PICASSO, A MI AMIGA ALICIA EMBRIZ.**

## INDICE

Introducción	1
1. Evolución de la mampostería.	3
1.1 El adobe y el ladrillo	4
1.2 La mampostería en México	6
1.3 La mampostería romana	8
1.4 Mampostería reforzada	10
2. Materiales para mampostería de piedras artificiales y estructuras a base de muros de mampostería	12
2.1 Piedras artificiales	12
2.2 Mortero	16
2.3 Acero de refuerzo	23
2.4 Concreto	25
2.5 Tipos de muro	26
2.5.1 Muros diafragma	26
2.5.2 Muros confinados	29
2.5.3 Muros reforzados interiormente	31
2.5.4 Muros no reforzados	31
2.6 Sistemas de piso	34
2.7 Cimentaciones	36
3. Comportamiento mecánico en muros de mampostería	38
3.1 Comportamiento mecánico de la mampostería no reforzada	38
3.1.1 Comportamiento mecánico de las piezas	40
3.1.2 Comportamiento mecánico del mortero	41
3.1.3 Comportamiento mecánico de la mampostería a compresión	42
3.1.4 Comportamiento mecánico a tensión diagonal	44



3.2 Comportamiento mecánico de la mampostería confinada	47
3.2.1 Comportamiento mecánico ante cargas laterales	47
3.2.2 Comportamiento mecánico ante cargas laterales reversibles	50
4. Análisis de estructuras de mampostería	51
4.1 Análisis y resistencia a la carga vertical	51
4.2 Análisis y resistencia a la carga lateral	53
4.2.1 Método simplificado	56
4.2.3 Método de análisis estático	57
4.2.3 Método de análisis dinámico	60
4.3 Resistencia a la flexocompresión	60
5. Evaluación y análisis de las grietas en estructuras de mampostería	62
5.1 Evaluación de estructuras existentes	63
5.1.1 Registro de construcción y diseño	63
5.1.2 Inspección	63
5.1.3 Materiales	65
5.2 Evaluación de grietas	65
5.3 Pruebas a muros de mampostería	75
5.3.1 Inspección visual	76
5.3.2 Martillo de rebote	76
5.3.3 Extracción	78
5.3.4 Barrenado	79
5.3.5 Penetración	79
5.3.6 Corte en el plano	81
5.3.7 Corazones	83
5.3.8 Adherencia ( mortero - pieza )	84
5.3.9 Gatos planos	85
5.3.10 Trasmisión de pulso	88
5.3.11 Medición del eco producido	90
5.3.12 Tomografía	91
5.3.13 Métodos magnéticos	92
5.3.14 Radiografía	92
5.3.15 Termografía	93
5.3.16 Emisión acústica	94
5.3.17 Pulsos electromagnéticos	94
5.3.18 Interferometría láser	94
5.3.19 Petrografía	95

5.3.20 Endoscopia	95
5.3.21 Pruebas de carga	95
5.3.22 Potencial de corrosión	96
6. Técnicas de rehabilitación	97
6.1 Reemplazo de piezas y de concreto	98
6.2 Reparación de grietas	100
6.2.1 Aplicación de resinas	101
6.2.2 Aplicación de morteros de cemento	102
6.2.3 Reparación de grietas con rajuelas	104
6.3 Colocación de refuerzo	105
6.4 Encamisado de muros	107
6.4.1 Encamisado con mallas metálicas	107
6.4.2 Encamisado con mallas sintéticas	112
6.5 Adición de dadas y castillos	117
Conclusiones	118
Bibliografía	120

## **Introducción .**

En la ciudad de México como en tantas ciudades del mundo la mayoría de las construcciones que existen son a base de muros de mampostería de piedras artificiales es decir de piedras o piezas fabricadas artificialmente.

Durante los sismos de 1985 en la Ciudad de México, quedaron a descubierto graves deficiencias en las construcciones a base de muros de mampostería. Las cuales no cumplían con el reglamento vigente o fueron construidas con materiales muy pobres, presentando también grave deterioro por la humedad y el intemperismo. Al mismo tiempo presentando agrietamiento que al parecer eran consecuencia de asentamientos diferenciales o del los sismos. Y que en su gran mayoría fueron demolidas indiscriminadamente.

En este trabajo se expondrán las principales técnicas de rehabilitación en muros de mampostería de piedras artificiales, puesto que después de los sismos, durante la reconstrucción un gran número de construcciones a base de muros de mampostería fueron demolidas indiscriminadamente.

El hecho de que en las escuelas de ingeniería, se de poca importancia a este tema de la mampostería a pesar que en nuestro país más de 70% de las construcciones estén realizadas a base de muros de mampostería. Repercute esencialmente en la poca información existente, lo aislada y dispersa de esta misma, aún en las instituciones dedicadas a la investigación.

La investigación documental, fue la herramienta para realización de este trabajo, mediante esta técnica se trato de aglutinar y dar forma sistemática a toda la información. Que se encontraba en artículos, conferencias, tesis, trabajos de investigación, apuntes y reglamentos de construcción. Así como algunas investigaciones de campo para comprobar parte de la información obtenida durante la investigación.

En el primer capítulo, se describe brevemente la historia de la mampostería en el mundo desde que esta surgió y su evolución a través de las grandes civilizaciones. Como en América , Europa y Asia hasta llegar a mampostería reforzada que es la que actualmente se conoce.

El segundo capítulo se describen los principales materiales de los cuales se construyen las mampostería y sus características principales. Las características de los diferentes tipos de muros que hay, además de describir los sistemas de piso, las cimentaciones, que forman parte fundamental en una construcción a base de muros de mampostería.

El tercer capítulo se describe el comportamiento de la mampostería no reforzada, iniciando con el comportamiento de elementos principales que forman a esta ( la pieza , y el mortero), para posteriormente describir el comportamiento de ambos en conjunto a compresión y a tensión diagonal. Por ultimo se analizan las mamposterías confinadas ante cargas laterales y ante cargas laterales reversibles.

Para el cuarto capítulo se explicara brevemente los diferentes tipos de análisis, con los que se pueden revisar o diseñar las estructuras a base de muros de mampostería.

En el penúltimo capítulo se hace mención a la evaluación de estructuras existentes, como la forma en que se clasifican las grietas y las principales pruebas que se realizan a las mamposterías para detectar grietas o cualquier otra anomalía que afecte el correcto funcionamiento de estas.

El capítulo seis se describen las principales técnicas de rehabilitación de muros de mampostería y en que etapa de acuerdo al daño se pueden aplicar.

## 1. Evolución de la mampostería.

Desde los inicios de la humanidad el hombre ha tenido la necesidad de refugiarse de las inclemencias de la naturaleza. Seguramente así es como decide apilar piedras ramas para formar un refugio. Sin embargo la trasmisión de esta técnica fue muy lenta.

Seguramente la transformación del hombre nómada al hombre sedentario marco la historia de la humanidad y el inicio formal de la mampostería, al formar pequeñas aldeas . En las cuales se empieza a utilizar el barro para unir con mayor facilidad las piedras irregulares naturales. Creando de esta forma el primer mortero para la mampostería, dando como resultado, el poder apilar más piedras obteniendo mamposterías más altas y más resistentes.

Hay alrededor del mundo vestigios de aldeas prehistóricas construidas con piedras naturales y asentadas con barro, desde las islas Aran en Irlanda, hasta Catal Huyuk en Anatolia (ver ref.13,22).

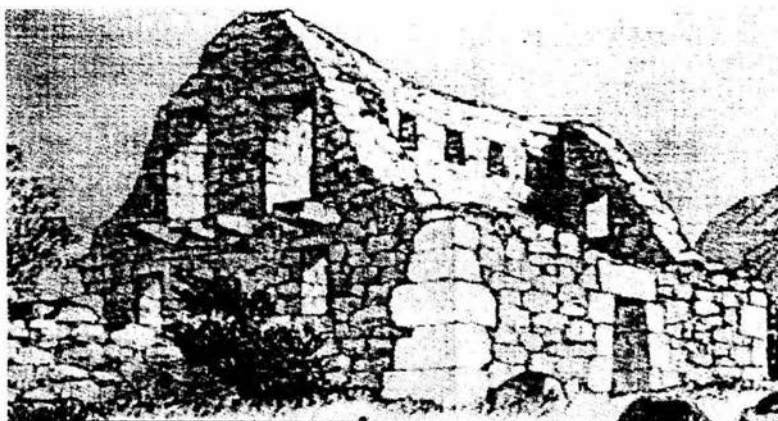


Figura 1.1 Ollantaytambo. Cusco, Perú. Muros de piedra asentados con barro y recubiertos Posteriormente con enlucido de barro ( siglo XIV )

En el continente Americano hay claras muestras de construcciones de este tipo un ejemplo son las hechas por los Incas en Ollantaytambo cerca de Cusco, Perú.

## 1.1 El adobe y el ladrillo

El adobe como unidad o pieza de mampostería surgió en lugares donde no existían bancos de piedras naturales para la construcción de mamposterías.

Hay que recordar que el adobe es una mezcla de barro revuelta con paja, que se seca al sol formando piezas que sustituyen a las piedras naturales. A estas piezas de barro mezcladas con paja a las cuales se les da la forma de un paralelepípedo recto en un molde de madera, fue una de las contribuciones más importantes de los Sumerios en el cuarto milenio a.C. considerados como los iniciadores de la ingeniería.

La creación del molde es uno de los avances más importantes en la construcción de la mampostería, ya que permite la producción de las unidades iguales y con mayor rapidez. Convirtiendo al adobe en medio de expresión y una contribución a las matemáticas aplicadas.

Uno de los primeros templos que fue edificado en la ciudad de Uruk 2900 a. C. En las excavaciones que se realizaron en esta ciudad se encontraron los cimientos de construcciones monumentales, una colina artificial y el prototipo del zigurat o torre escalonada en donde los adobes eran unidos con betún.

La primera pieza o ladrillo cerámico se creó en el tercer milenio a. C. Cuando el adobe fue llevado al horno. Para crear mamposterías el ladrillo fue asentado con mortero de betún o alquitrán al cual se adicionaba arena. Convirtiéndose así en un material de suma importancia para la construcción de los zigurats. En la ciudad de Ur 2125 a. C. el zigurat tiene una base de 62m. por 43m. y una altura de 21m.

En la antigua Babilonia se caracterizó por la utilización de ladrillos cerámicos que constaban de inscripciones en bajo relieve que relataban la construcción de la obra

Figura 1.2 Muro de unidades de arcilla decorativas : esmaltadas y vitrificadas ( Babilonia, primer milenio antes de Cristo ).



Así mismo se utilizaron las fibras de la caña, como refuerzo en el mortero en construcciones elevadas. Obteniéndose de esta forma una mampostería con una considerable resistencia a la tensión.

La fabricación de la mampostería alrededor del mundo esta determinada por las formaciones geológicas donde se asientan los pueblos. Así en Egipto al mismo tiempo que los Sumerios utilizaban el ladrillo cerámico, se utilizaron para las grandes obras roca traída de las montañas que se encuentran a lo largo del Nilo.

Las piezas de mampostería utilizadas en Egipto eran formaciones de granito, areniscas, calizas, basaltos y alabastros. Los cuales eran desprendidos perforando agujeros en los cuales se introducían cuñas metálicas. Posteriormente estos bloques eran labrados y trasportados hasta las grandes obras, donde se asentaban con un mortero a base de yeso y cal.

En Grecia donde se carecía de canteras como las que se encontraban en Egipto, se contaba con otro material de gran belleza, el mármol. Este material se utilizo para revestir las gruesas mamposterías de piedra caliza asentada con mortero de cal.



Figura 1.3 Grandes monolitos de piedra forman el núcleo de las grandes pirámides en Egipto.

## 1.2 La mampostería en México

La mampostería en México se desarrolló al igual que en otras partes del mundo de forma paralela, creando construcciones majestuosas que aún esta época sorprenden a propios y extraños. Las construcciones fueron realizadas en su mayoría utilizando piedras naturales o artificiales. La arquitectura que se desarrolló en Mesoamérica y en especial en México fue de piedra, con frecuencia finamente cortada y adornada con relieves.

En México son varias las culturas que se distinguieron por sus construcciones entre ellas podemos mencionar; los Olmecas, Totonacas, Aztecas y Mayas.



Los totonacas utilizaron en la construcción de sus pirámides piedras naturales, usando el barro para ligarlas rematando las fachadas con bloques y placas de piedra labradas.

La cultura Azteca se caracterizó por las construcciones en taludes escalonados y las construcciones en barro revestido de piedra. Otra de las características de las construcciones que se han encontrado en la zona de Teotihuacán, es que las casas tenían cimientos de piedra.

Los Mayas fue el pueblo que más aportaciones hiciera. El uso de la llamada bóveda Maya que se iniciara con el techado de las tumbas, fue una técnica que se propagó rápidamente y permitió la sustitución de techos de palma por los de mampostería. Esta técnica, como era de esperarse llegó primero a las construcciones dedicadas a la religión y a las clases privilegiadas. Las casas de estas clases eran en su totalidad de mampostería construidas sobre plataformas o terrazas. La bóveda maya no es más que dos muros que se juntan en la parte superior por aproximaciones de las hiladas de piedra. El enorme peso de las bóvedas y los muros de mampostería que se alzaban sobre ellas, obligaba a aumentar el grosor de las paredes y a reducir los banos (ver ref.22).



Figura 1.4 Pirámide de los nichos en el Tajin donde se muestra fachada a base de bloques y placas de piedra.

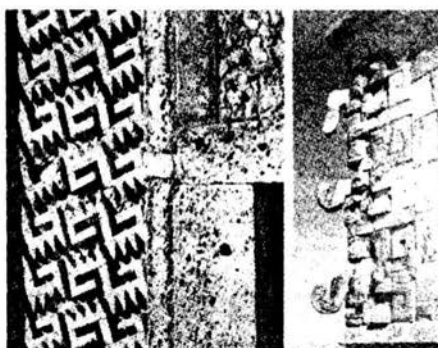


Figura 1.5 A la derecha, basamento y adornos mayas de Kabah, a la izquierda relieves de Mitla.

### 1.3 La mampostería romana.

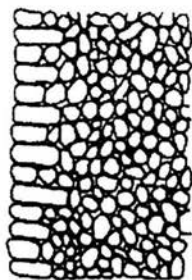
Uno de los pueblos más importantes de Europa fue sin duda el romano, no solo por el gran imperio que formaron, conquistando gran parte de Europa, Asia, y el norte de África.

Por tal motivo no es raro encontrar en la arquitectura romana materiales traídos de Grecia y Egipto, además del uso del ladrillo de arcilla utilizado en Sumeria. A esto los romanos aportaron una nueva técnica constructiva y la invención de mortero de cemento y del concreto.

Esta nueva técnica constructiva consistió en el desarrollo de diferentes sistemas de construcción de muros, que eran más económicos y más fáciles de construir empleando el nuevo mortero de cal. Un polvo que se encuentra alrededor del monte Vesubio, que al combinarse con cal y piedras es capaz de endurecer bajo el agua y, provee a las construcciones de una mayor resistencia.

La mezcla de estos tres elementos es lo hoy se conoce con el nombre de concreto hidráulico ( aglomerante hidráulico, agregado grueso y agua).

Figura 1.6 Los tres tipos de muros romanos.



a) Opus incertum



b) Opus reticulatum



c) Opus testaceum

El aglomerante hidráulico se elabora mezclando dos partes de arena volcánica, con una parte de cal. Los óxidos de sílice finamente pulverizados, contenidos naturalmente en la puzolana, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio ( cal ) en presencia del agua.

El nuevo mortero permitió a los romanos la creación de grandes obras urbanas, viales, portuarias e hidráulicas, asentando con el mortero piedras o ladrillos formando mamposterías, o para elaborar concreto, con el cual se construyeron muros, bases de pavimentos y cimentaciones.

Así mismo el molde de concreto estaba constituido por muros de mampostería hecho de ladrillos cerámicos asentados con mortero. Para formar cúpulas los romanos desarrollaron moldes de madera. La nueva era constructiva de los romanos gracias al mortero tuvo las siguientes repercusiones:

- a) La construcción de cimentaciones más resistentes.
- b) La construcción más rápida de muros. Los muros de mampostería romanos que se utilizaban para las obras públicas estaban fabricados de piedras naturales o ladrillos cerámicos asentados con mortero de cal. Para los muros de mayor espesor, se fabricaban dos muros delgados que formaban una especie de cimbra la cual se rellenaba de piedras y pedacearía de ladrillo asentada con mortero de arena y cal. Para lo cual estos muros tardaban bastante tiempo en ganar la resistencia adecuada. La invención del nuevo mortero de cemento permitió la construcción de las mamposterías romanas en un breve periodo de tiempo, permitiendo así una infraestructura adecuada al proceso de expansión del imperio.
- c) El libre desarrollo de la tecnología del arco, la bóveda y la cúpula.
- d) Posibilitar aberturas totales o parciales en muros usando arcos o bóvedas dando así una herramienta de gran potencial.



Figura 1.7 El panteón de Agripa en Roma construido entre 118 y 128 edificio de planta circular de mampostería y concreto con acabado de ladrillo en el exterior y mármol en el interior cubierto con una gran cúpula de concreto (ver ref. 22).

#### 1.4 Mampostería reforzada.

Después del significativo avance que se tuvo en roma con la construcción de mampostería se detuvo por varios siglos en que se perdió esta técnica. Hasta que en 1756 el ingeniero ingles Smeaton reconoció la necesidad de usar en Inglaterra una mezcla de cal y puzolana italiana para la fabricación de elementos que estarían bajo el agua.

En Inglaterra la mampostería fue usada para controlar los incendios que destruyeron ciudades medievales. Después del incendio de 1666 Londres dejó de ser una ciudad de madera para convertirse en una ciudad de mampostería.

Se puede decir que la mampostería ha evolucionado a la par de la humanidad , con la revolución industrial donde se mejoro y mecanizo la producción de ladrillos.

Dando paso a los métodos científicos de producción y dejando los métodos de producción artesanal. En 1813 el ingeniero británico, Brunel propuso el refuerzo de una chimenea a base de mampostería en construcción con barras de hierro forjado.

Sin embargo fue durante la construcción del túnel bajo el río Támesis en 1825 en la cual se aplico dicha técnica de reforzar la mampostería. Construyendo dos accesos verticales de 15 m. de diámetro y 20 m. de profundidad con muros de arcilla de 75 cm. de espesor reforzados verticalmente con pernos de hierro forjado de 25mm. de diámetro y zunchos de plata banda de 200 mm. de ancho y 12 mm. de espesor. Los accesos fueron contruidos a nivel del terreno y posteriormente hundidos excavando en el interior de ellos.

Brunel y Pasley ensayaron con vigas de mampostería reforzada con pernos de hierro forjado cargándolas hasta la ruptura sin que lograran en método racional de diseño.

En 1889 el francés Paul Cottancin patento un método para construir edificaciones de mampostería reforzada. En 1920 se construyeron en la India varias obras de mampostería reforzada. En las cuales se ensayaron 682 especímenes entre vigas, losas, columnas, y arcos. Constituyendo así la primera investigación organizada acerca de la mampostería reforzada( ver ref. 13 ).

## **2. Materiales para mampostería de piedras artificiales y estructuras a base de muros de mampostería**

### **2.1 Piedras artificiales.**

Las piedras artificiales son todas aquellas piezas fabricadas mediante un proceso de transformación para su uso en la construcción. En nuestro país el mercado ofrece una gran variedad de piedras artificiales para la fabricación de muros de mampostería, que van desde las características geométricas, el material del cual están fabricados y por el proceso de fabricación (ver ref. 30).

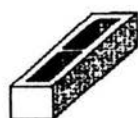
La forma de las piezas es prismática pero, con distintas relaciones entre sus dimensiones. En cuanto al proceso de fabricación son muy diversos, desde los más antiguos como el cocido de tabique de barro, hasta la fabricación en serie como la vibro compactación para los de concreto y la extrusión para los bloques huecos de barro ( ver ref.25 ).

Las piezas que se utilizan para la construcción de muros de mampostería deben de cumplir con los requisitos especificados de la Dirección General de Normas de la SECOFI para cada material.

C-6 Ladrillos y bloques cerámicos de barro, arcilla o similares.

C-10 Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto.

C-404 Bloques, tabiques, ladrillos y tabicones para uso estructural.



Bloques para  
muros lisos



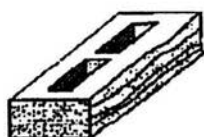
Decorama



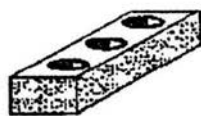
Trapecio



Achurado



Vibro adobe



Agregado expuesto

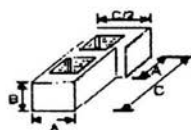


Muro pedrín

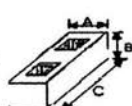


Señorial

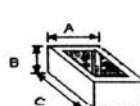
Figura 2.1 Piezas en relieve para mampostería.



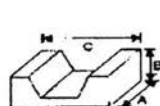
Esquina



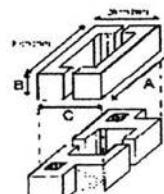
Tipo entero



Tipo medio



Tipo U



Tipo columna

Tipo entero	Tipo medio	Esquina	Tipo U	Tipo columna
A x B x C				
10x20x40 12x20x40 15x20x40 20x20x40	10x20x20 12x20x40 15x20x40 20x20x40	12x20x40 15x20x40	12x20x40 12x20x20 15x20x40 15x20x20 20x20x40 20x20x20	20x20x40 22x20x40 25x20x40 30x20x40

Figura 2,2 Dimensiones y tipos de bloque de concreto.

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería especifica que: las piezas para su uso estructural serán macizas aquellas cuya sección trasversal más desfavorable tiene un área neta mayor o igual al 75% del área total y cuyas paredes tienen un espesor mayor o igual a 2cm.

Las piezas huecas son las que tienen en su sección trasversal más desfavorable un área neta mayor o igual al 45% pero menor al 75% del área total y el espesor de las paredes exteriores no es menor de 1.5 cm. ( ver ref. 8 )

Generalmente la resistencia de las piezas artificiales se determina en forma experimental por el ensaye de una pieza o de una mitad de ella, por lo que los especímenes son muy distintos y es difícil establecer comparaciones entre materiales distintos. Es de gran importancia la esbeltez de una pieza, que influye en la restricción al desplazamiento lateral por las cabezas de la máquina de ensaye.

Tabla 2.1 Características de típicas de algunas piedras artificiales ( referencia 25 ).

Material	Resistencia a compresión $f_p$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variación, CV	Peso volumétrico (t/m <sup>3</sup> )
Tabique rojo de barro recocido	35 – 115	10 – 30	1.30 – 1.50
tabique extruído perforado verticalmente	150 – 430 310 – 570 150 – 400	11 – 25 15 – 20 11 – 26	1.65 – 1.96 1.61 – 2.06 1.66 – 2.20
tabique extruído macizo	375 – 900	5 – 16	1.73 – 2.05
tabique extruído, huecos horizontales	75 – 80 50 – 80	13 – 16 16 – 30	1.25 – 1.32 1.69 – 1.78
Bloques de concreto			
Ligero	20 – 50	10 – 26	0.95 – 1.21
Intermedio	20 – 80	7 – 29	1.32 – 1.70
Pesado	70 – 145	7 – 28	1.79 – 2.15
Tabicón	45 – 120	11 – 35	1.05 – 1.60
Silicio Calcáreo	175 – 200	11– 15	1.79



La irregularidad en la superficie de las piezas impide determinar su resistencia real sobre el área neta del material ( Por ejemplo en piezas con huecos horizontales ). Por tal motivo es usual definir la resistencia sobre el área bruta, es decir sobre el área dada por las dimensiones exteriores.

En términos generales se puede apreciar que la variabilidad de la resistencia es elevada, tanto para las piezas de producción artesanal, como las que se producen industrialmente en las cuales la apariencia superficial y geométrica son las características que se cuidan más en el control de calidad, que la resistencia.

Hay que mencionar que en la tabla anterior faltan dos materiales que son el adobe y el tabique de suelo-cemento. El adobe es un material de gran importancia en el medio rural y su resistencia a la compresión es de alrededor de  $15 \text{ kg/cm}^2$ . El tabique de suelo cemento es un material muy económico debido a su bajo costo, se elabora utilizando suelos de ciertas características y cemento Pórtland.

Las piedras artificiales ( piezas ) que se utilizan con fines estructurales se clasifican en tabiques, bloques y tabicones y deben cumplir con los siguientes requisitos que marca la norma C-404.

**Tabique:** fabricado de forma prismática con arcillas comprimidas o extruídas, mediante un proceso de cocción o de otros materiales con procesos diferentes, las dimensiones normales mínimas deben ser de 5 cm. de alto, 10 de ancho y 19 cm. de largo sin incluir la junta de albañilería.

**Bloque:** fabricado por moldeo de concreto y/ o de otros materiales, puede ser macizo o hueco las dimensiones normales de las piezas deben basarse en el módulo de 10 cm. en múltiplos o submúltiplos, estando incluida la junta de albañilería de 1 cm. de espesor sus dimensiones mínimas deben ser 10 cm. de alto, 10 cm. de ancho y 30 cm. de largo. Las dimensiones de la pared exterior deben ser de 2.5 cm. como mínimo.

**Tabicón:** fabricado de concreto u otros materiales. Las dimensiones mínimas deben ser de 6 cm. de alto, 10 cm. de ancho y 24 cm, de largo. Se incluye la junta de albañilería.

La norma NMX C-404 indica además que en localidades que cuenten con reglamento de construcciones posterior a 1985 y tenga disposiciones de diseño sismo resistente para estructuras de mampostería, regirán las disposiciones en dicho reglamento, en caso contrario regirán las especificaciones de la norma NMX C-404.

En donde se indican las resistencias mínimas a la compresión para las piezas de mampostería que se utilizan con fines estructurales.

La resistencia es de  $60 \text{ kg/cm}^2$  para los bloques y los tabiques recocidos y de  $100 \text{ kg/cm}^2$  para los tabiques extruidos con hueco vertical y tabicones.

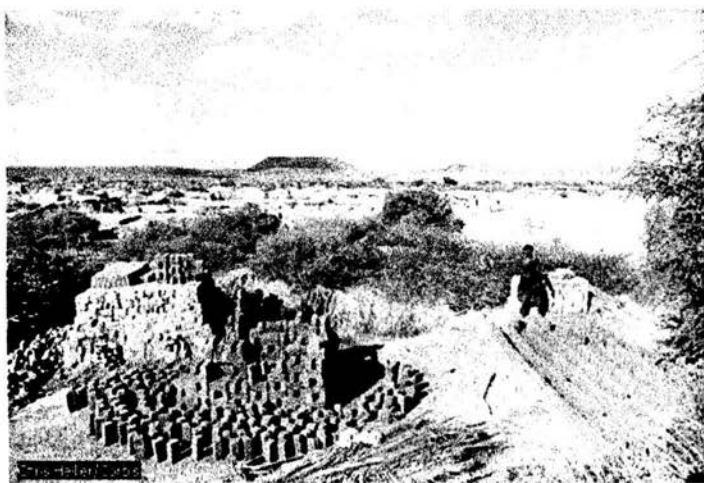


Figura 2.3 La fabricación del tabique aún se hace de forma artesanal en diversas partes del mundo.

## 2.2 Mortero

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes de la combinación de arena y agua con material cementante, cal, yeso, cemento o una combinación de estos. La principal función de un mortero es la de permitir la sobre posición de las piezas formando un conjunto que tenga una liga fuerte y duradera.

Entre las propiedades más importantes de los morteros son: manejabilidad, rapidez de fraguado, impermeabilidad, modulo de elasticidad, resistencia a la compresión y tensión( ver ref. 17 ).

Todas estas propiedades varían de acuerdo al tipo de cementante empleado, con la relación entre arena - cementante y la cantidad de agua empleada. Otra de las características importantes de los morteros es la retención de agua durante el fraguado evitando así que las piezas absorba el agua después de su colocación.

Los morteros que se realizan con cal como cementante son de baja resistencia a la compresión del orden de 1 a 10 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad es aproximadamente de 3000 kg/cm<sup>2</sup> y su peso volumétrico es de 2.1 ton/m<sup>3</sup>. Además de estas características los morteros de cal son muy trabajables, de fraguado lento y con buena retención de agua.

El fraguado lento es de gran utilidad en las construcciones de mampostería, porque permite la elaboración de una sola mezcla durante toda la jornada de trabajo, pero perjudicial porque afecta la resistencia de la mampostería que se desarrolla muy lentamente. Por lo que son descartados para su uso en la elaboración de estructuras de mampostería.

En morteros elaborados a base de cemento tienen una resistencia a la compresión mucho mas elevada que los de cal entre 40 y 200 kg/cm<sup>2</sup>. Su módulo de elasticidad varia entre 10000 y 50000 kg/cm<sup>2</sup>. y peso volumétrico es de 2.1 ton/ m<sup>3</sup>. El fraguado de estos morteros es mucho más rápido que los de cal por tal motivo no deben utilizarse una hora después de su elaboración, también son menos trabajables que los de cal y retienen menos agua que los morteros de cal.

Los morteros de yeso se caracterizan por resistencias muy bajas y fraguado muy rápido solo se utilizan en fraguados muy específicos. Hay morteros que se elaboran con más de un cementante que se les conoce con el nombre de morteros mixtos o bastardos.

En nuestro país es común la practica de elaborar morteros con cemento y cal, que reúne las características de ambos cementantes. Porque se obtiene una mezcla de buena resistencia debida al cemento, se evita la perdida de agua y se gana trabajabilidad por la cal.

En el mercado mexicano se encuentran morteros premezclados ( cementos de albañilería ), que contienen cemento, cal y aditivos plastificantes. La resistencia a la compresión de estos morteros se determina mediante el ensaye de probetas cúbicas de 5 cm. de lado, siendo este el índice de resistencia más aceptado.

De acuerdo con las NTCM la relación arena-cementante adecuado debe de estar entre 2.25 y 3, obteniendo así mezclas de buena resistencia , buena adherencia con la pieza y baja contracción. La variabilidad en la resistencia que se obtiene para un proporcionamiento dado es considerable debido a que la dosificación se hace en volumen sin controlar la cantidad de agua que se les agrega. Por lo que el coeficiente de variación oscila entre un 20 y 30%.

Las NTCM especifican que los morteros que se empleen en elementos estructurales de mampostería deberán cumplir con los siguientes requisitos.

- 1.- Su resistencia a la compresión será por lo menos de 40 kg/cm<sup>2</sup>.
- 2.- La relación volumétrica entre arena y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 3.
- 3.- La resistencia se determinará según lo especificado la norma NOM C-61.
- 4.- Se empleará la mínima cantidad de agua que de cómo resultado un mortero fácilmente trabajable( ver ref. 8 ).

Tabla 2.2 Proporcionamientos recomendados para morteros en elementos estructurales.

Tipo de mortero	Partes de cemento	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Valor típico de la resistencia nominal en compresión Kg/cm <sup>2</sup>
I	1 1	0 0 a 1/2	0 a 1/4 0	125
II	1 1	0 1/2 a 1	1/4 a 1/2 0	75
III	1	0	1/2 a 1 1/4	40
<b>Partes de arena ( medida en estado suelto )</b>				
<b>No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de los cementantes en volumen</b>				

El reglamento de Construcciones del Distrito Federal establece que los morteros se utilizarán de acuerdo a su tipo Ver ref. 30):

**Tipo I:** en mamposterías expuestas a agentes externos agresivos y que soportan altas cargas. En el caso de los cimientos de piedra o de aquellas mamposterías que están expuestas en medios altamente húmedos conviene que sean preparados exclusivamente con cemento-arena.

**Tipo II:** se usarán en la mayoría de los muros de mampostería incluyendo los de carga.

**Tipo III:** funcionan con muros de poca carga como los divisorios que soportan solo su propio peso. Estos morteros por la gran cantidad de cal que tienen son muy plásticos lo que favorece su empleo en aplanados, facilitando su aplicación y posteriormente comportándose elásticamente ante los cambios de temperatura.

Numerosas investigaciones han podido demostrar que la adherencia entre el mortero y las piezas de mampostería es de orden mecánico. Durante la fabricación de una estructura de mampostería se coloca el mortero en la pieza, está succiona parte de la lechada del mortero que se introduce en los poros capilares de la pieza. Esta lechada al cristalizarse dentro de la pieza forma el amarre mecánico entre los elementos ( adherencia).

Este fenómeno se incrementa considerablemente en las piezas con mayor rugosidad superficial en su cara de contacto como por la presencia de cavidades en la misma cara de contacto llamados alvéolos.

En la siguiente ilustración se representa gráficamente el proceso de adherencia entre dos piezas. Del cual se puede notar que las piezas inferiores desarrollan una mayor adherencia al succionar una mayor cantidad de lechada, que la superior debido al proceso constructivo.

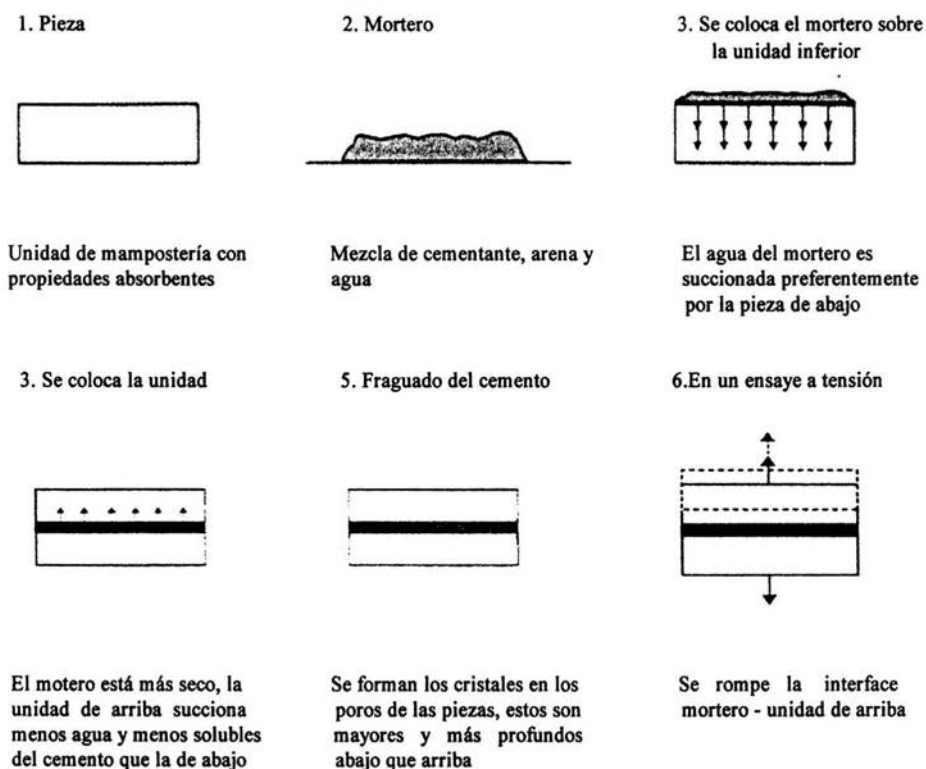


Figura 2.4 Acción mecánica de la adherencia entre las piezas el mortero

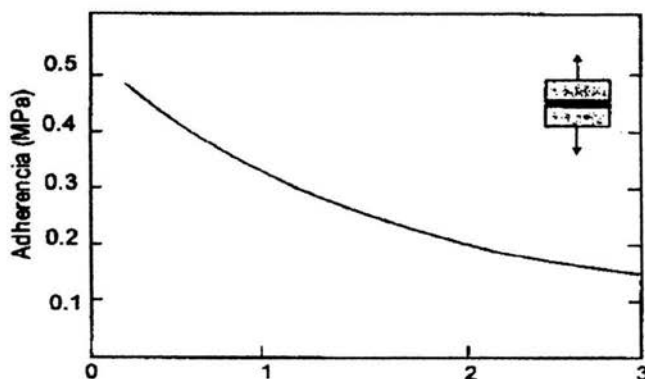
Para minimizar este fenómeno se recomiendan los siguientes procedimientos para incrementar la adherencia.

- a) Proveer juntas de mortero más gruesas, para evitar que la succión ejercida por la pieza inferior no alcance a afectar el agua disponible para la pieza superior. La consecuencia de grosor en la junta se refleja en la baja de resistencia a la compresión de la mampostería.

b) Reducción de la succión en el momento del asentamiento de las piezas particularmente cuando esta es elevada. Esto se puede realizar humedeciendo las piezas antes de su colocación.

c) Elevar la consistencia del mortero ( aumentando la cantidad de agua en el mismo ) o aumentando su retenividad, ( calidad del mortero que mide la consistencia o fluidez durante su colocación, cuando entra en contacto con la superficies absorbentes.), por ejemplo, agregando cal a la dosificación del mortero. Sin olvidar que esta posibilidad tiene sus limitaciones , afectando la resistencia del mortero.

En las siguientes figuras se muestra en forma general el efecto de diferentes parámetros en la adherencia medida en ensayos a tensión. En los cuales se puede observar que la succión es mucho mayor por las piezas al momento de la colocación del mortero, que tiene un rango entre los 10 y 40 gramos, en donde la adherencia es máxima. También se puede observar que los morteros con elevadas cantidades de cal y arena reducen la adherencia. Al reducir el contenido de cementante se reduce el número de cristales que se introducen en las cavidades de las piezas necesarias para formar el amarre entre estas y el mortero ( adherencia ).



Tiempo entre la colocación del mortero y el asentado de la unidad de arriba ( minutos ).

Figura 2.5 Variación de la adherencia con respecto a la demora del asentado de la pieza superior.

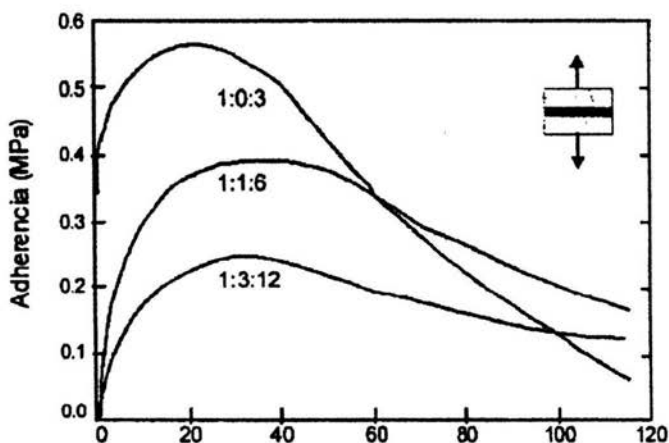


Figura 2.6 Efecto de la succión de las piezas en la adherencia para diferentes proporciones del mortero.

Así mismo se observa que si se demora la colocación de la pieza superior se permite la evaporación de la lechada o que la pieza de abajo extraiga mayor cantidad de agua disminuyendo la cantidad de cristales que podrían introducirse en la pieza superior. Se debe tener cuidado de no retirar la pieza una vez colocada puesto que se pierde la adherencia ( ver ref. 13 ).



## 2.3 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo que se utilizará en los castillos, dalas y en el interior de los muros de acuerdo con la NTCM será:

- 1.- Barras corrugadas que cumplan con las especificaciones NMX B6 y NMX B294.
- 2.- Malla electro soldada que cumpla con las especificaciones B 290.
- 3.- Alambres corrugados laminados en frío que cumplan con la norma B 72.
- 4.- Alambre liso de acero estirado en frío para refuerzo de concreto NMX B253.
- 5.- Armaduras electro soldadas de alambre de acero para castillos y dalas que cumplan con la norma NMX B456.

De acuerdo con la NTCM se admite el uso de barras lisas únicamente en estribos, en mallas electro soldadas o en conectores. Se podrán utilizar otros tipos de refuerzo siempre y cuando se demuestre a satisfacción del D.D.F. su eficacia como refuerzo estructural. Como esfuerzo de diseño,  $f_y$ , se considerará el de fluencia especificado por el fabricante.

Es recomendable utilizar la mayor cantidad de barras y alambres de pequeño diámetro para colocarse como refuerzo interior en las juntas o huecos de las piezas. Asegurando así un recubrimiento adecuado y facilitando el correcto colado de los espacios donde se coloca el refuerzo. La colocación del refuerzo horizontal en las juntas de mortero mediante las barras y alambres de diámetro pequeño, mejora la resistencia al cortante, reduce el ancho de grietas y proporciona una mayor capacidad de deformación ante la acción cargas laterales.

El acero que se utiliza en las juntas de mortero tiene que ser delgado y cuyo diámetro no exceda la mitad del espesor de la junta o con armaduras de acero prefabricadas. En estos dos casos el alambre puede ser liso o corrugado.

El tipo de acero que se utiliza en la mampostería confinada y en la mampostería con refuerzo interior, no difiere al empleado en el concreto reforzado.

Tabla 2.3 Acero de refuerzo comúnmente utilizado en construcción de vivienda.

Denominación	Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg)	Fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Nota
Alambrón No.2	6.4	1/4	0.32	0.251	2800	lisa
No. 2.5	7.9	5/16	0.49	0.384	4200	Corrugada
No. 3	9.5	3/8	0.71	0.557	4200	Corrugada
No. 4	12.7	1/2	1.27	0.996	4200	Corrugada
No. 5	15.9	5/8	1.91	1.560	4200	Corrugada

Tabla 2.4 Características de acero de refuerzo de alta resistencia.

Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg)	Fy (kg/cm <sup>2</sup> )	Nota	NMX
4.0	5/32	0.12	0.10	6000	Corrugada	B-72
4.8	3/16	0.18	0.14	6000	Corrugada	B-72
6.4	1/4	0.32	0.25	6000	Corrugada	B-72
7.9	5/16	0.49	0.39	6000	Corrugada	B-72

## 2.4 Concreto

El concreto es un material pétreo de creación artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas, de cemento, agregados y agua. El cemento y el agua forman una pasta que rodea a los agregados, formando un material heterogéneo. Al cual se le pueden agregar ciertas sustancias llamadas aditivos que mejoran o modifican sus características.

En la mampostería reforzada interiormente para lograr la integración del acero de refuerzo con la mampostería, los huecos de las piezas se rellenan con concreto. Para poder vaciar el concreto en los huecos tan pequeños este debe tener una gran fluidez.

Durante la construcción de mamposterías reforzadas se busca que el concreto tenga una elevada trabajabilidad. Por lo tanto se recomienda que tenga un revenimiento de 20 cm. Para lo cual se debe de tener elevadas cantidades de agua, sin producir segregación de los materiales, con relaciones de agua/cemento entre 0.8 y 1.2. Con estas relaciones se puede predecir que se obtiene un concreto de baja resistencia, pero al colocar el concreto en los huecos de las piezas, estas absorben parte del agua bajando la relación agua/cemento a 0.6. La consistencia del concreto líquido es de vital importancia puesto que debe ser compatible con los espacios a rellenar y con las características de absorción de las piezas.

El tamaño máximo de agregado (TMA) será limitado por los huecos de las piezas, las NTCM recomiendan no usar TMA mayores de 1 cm. La transportación y el vaciado del concreto, puede efectuarse por cualquier método evitando siempre la segregación. Durante el vaciado debe tenerse especial cuidado de no dejar aire atrapado en los huecos de las piezas. Este se puede lograr mediante el vibrado.

## 2.5 Tipos de muros

En el desarrollo de la mampostería a lo largo de la historia, en diversas culturas han surgido nuevos materiales y sistemas constructivos para la fabricación de muros. Orientados a proporcionar mayor confort, apariencia, durabilidad, pero sobre todo a reducir los costos de fabricación. De esta forma en la actualidad podemos encontrar varios sistemas constructivos de muros dependiendo de su función estructural.

- a) Muro diafragma.
- b) Muro confinado.
- c) Muro reforzado interiormente.
- d) Muro no reforzado.

### 2.5.1 Muros diafragma

Los muros diafragma son aquellos que se colocan para cerrar las crujías que forman las vigas ( o losas) y columnas de un marco estructural de concreto o de acero. Estos muros forman un diafragma, que proporciona un incremento notable de rigidez al conjunto bajo la acción de cargas laterales.

Estos muros generalmente son ligados a la estructura principal, la unión del muro y la estructura debe garantizar la posibilidad de que no suceda el volteo del muro perpendicular a su plano. Las columnas del marco deberán tener la capacidad de resistir, cada una, en una longitud igual a una cuarta parte de su altura libre una fuerza cortante igual a la mitad de la carga lateral que actúa sobre el tablero.

Generalmente estos muros se integran al marco usándolos como cimbra de las trabes y columnas. Se pueden colocar también una vez colados las trabes y castillos usando dadas o castillos de empaque, utilizando mortero con aditivo expansor en la mezcla en lugar de la última hilada.

En ocasiones se construye la estructura principal para posteriormente colocar el muro diafragma utilizando en el marco perfiles de lámina para formar un marco adosado a las vigas y columnas. Permitiendo de esta forma la colocación del muro de bloques de concreto, de tabique, de concreto celular o ligero. Constituyendo así un empaque para el muro diafragma.

La gran rigidez que proporcionan estos muros a la estructura altera significativamente la distribución de las fuerzas entre los elementos de esta, por lo que se debe cuidar este efecto al momento de analizar la estructura para cargas laterales. Las distribuciones asimétricas de estos muros dentro de la estructura pueden resultar perjudiciales o también en cantidades radicalmente distintas entre piso y piso.

Al sobrepasar la capacidad de tensión diagonal de los muros, se produce el agrietamiento, manteniendo una rigidez significativa, tienden a concentrar fuerzas cortantes en los extremos de las columnas. Por lo que es necesario reforzar las columnas en estas zonas, para una fuerza cortante igual a la capacidad total del muro, distribuida en partes iguales entre las dos columnas.

En algunos casos cuando no se puede distribuir uniformemente los muros o cuando la estructura es muy flexible, es recomendable desligar estos muros de la estructura principal evitando su trabajo como diafragma. Por lo que se deberán construir dejando holguras generosas y elementos de refuerzo o fijación que eviten la posibilidad de volteo del muro en dirección normal a su plano sin permitir el desplazamiento relativo del muro y de la estructura.

En la construcción de muros diafragma se debe evitar rellenar parcialmente el marco. Dejando la parte superior para la colocación de ventanas. La parte superior de la columna queda sujeta a una fuerza cortante muy elevada ( ver ref.23 ).

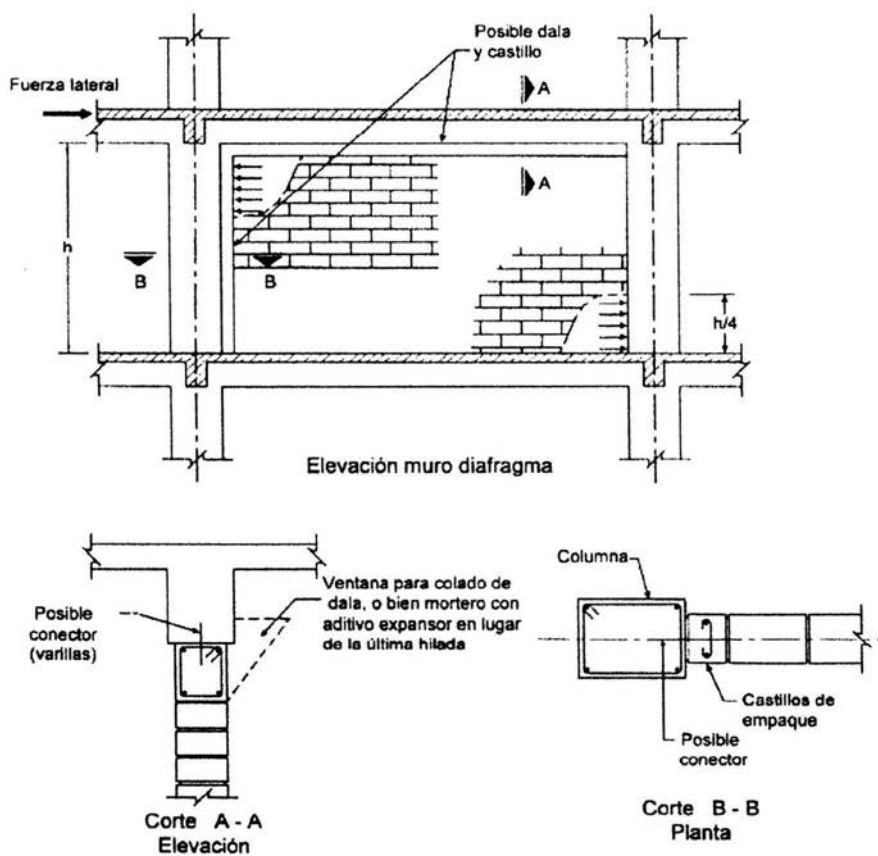


Figura 2.7 Elevación y detalles en planta de un muro diafragma.

## 2.5.2 Muros confinados

Son aquellos que se encuentran reforzados con dalas o castillos, que cumplan con los requerimientos geométricos y de refuerzo, de la sección 3.3 de las NTCM.

a) Dalas y castillos tendrán como dimensión mínima el espesor del muro. El concreto tendrá una resistencia mínima de  $150 \text{ kg/cm}^2$ , y el refuerzo longitudinal estará formado por tres barras por lo menos, cuya área no será menor a  $0.2 f'c / f_y$  por el área del castillo y deberá estar anclado debidamente a los elementos que limiten al muro de manera que pueda desarrollar su esfuerzo de fluencia.

b) El área de refuerzo transversal no será inferior a  $1000S / f_y dc$ .

$S$ = separación del estribo.  $f_y$ = fluencia del acero  
 $dc$ = peralte del castillo

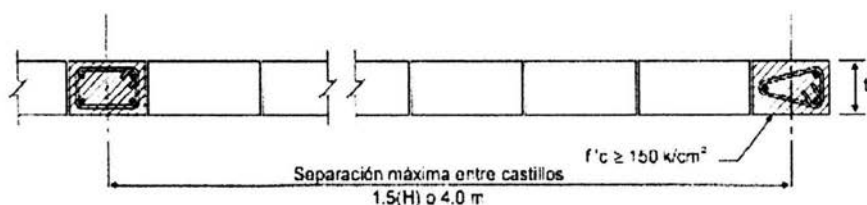
La separación de los estribos no excederá de  $1.5dc$  ni de 20 cm.

c) Existirán castillos por lo menos en los extremos de los muros y en puntos intermedios del muro ó una separación no mayor de una vez y media su altura, ni de 4m.

d) Existirá una dala en todo extremo horizontal del muro, ó a menos que este ultimo este ligado a un elemento de concreto reforzado de al menos 15 cm. de peralte. Además existirán dalas en el interior del muro a una separación no mayor de 3m.

e) Existirán elementos de refuerzo con las mismas características que las dalas y castillo en el perímetro de todo hueco cuya dimensión exceda de la cuarta parte de la longitud del muro en la misma dirección.

Los muros confinados han demostrado tener un comportamiento sísmico adecuado en edificios de muros de carga de varios niveles. Donde los elementos de refuerzo permiten una buena liga de los muros entre sí y con los sistemas de piso, proporcionan un confinamiento que evita la falla frágil de los muros después de que estos se agrietan por tensión diagonal.



- Refuerzo mínimo en dalas y castillos  $\rho = 0.20 \frac{f'c}{f_y}$  (3 varillas mín.)
- Área de estribos  $\geq \frac{1000 (s)}{(f_y) (dc)}$  en donde  $s \leq 1.5 dc$  o  $s \leq 1.5 dc$  o 20 cm.
- + Usar dalas intermedias si  $H > 3.0 \text{ m}$
- † Usar dalas de remate superior, excepto si el muro está ligado a elementos de concreto reforzado.
- ‡ Si  $\frac{H}{T} > 30$  se usarán elementos rigidizantes que eviten la posibilidad de pandeo

F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )				
	2530		4000		6000
150	P <sub>min</sub> = 0.0119		P <sub>min</sub> = 0.0075		P <sub>min</sub> = 0.005
	15 x 15	15 x 20	15 x 15		15 x 20
	3 φ 3/8"	4 φ 3/8"	3 φ 5/16"		4 φ 5/32"
	Est. φ 1/4"	Est. φ 1/4"	Est. φ 1/4"		Est. φ 1/4"
	@ 20 cm	@ 20 cm	@ 20 cm		@ 20 cm o Armex
200	P <sub>min</sub> = 0.0158		P <sub>min</sub> = 0.010		P <sub>min</sub> = 0.0067
	15 x 20	15 x 151	5 x 20	15 x 15	
	4 φ 5/8"	3 φ 5/16"	4 φ 5/16"	4 φ 5/32"	
	Est. φ 1/4"	Est. φ 1/4"	Est. φ 1/4"	Est. φ 1/4"	
	@ 20 cm	@ 20 cm	@ 20 cm	@ 20 cm o Armex	

Figura 2.8 Muros confinados reforzados perimetralmente con castillos y dalas.



No se admite incremento en la resistencia al cortante de la mampostería por la presencia de dadas y castillos solo un pequeño aumento en la resistencia a la compresión. La única forma de aumentar la resistencia al cortante de la mampostería es colocando refuerzo horizontal en las juntas.

### 2.5.3 Muros reforzados interiormente.

Son aquellos muros de piezas huecas en las cuales el acero de refuerzo, mediante barras se coloca verticalmente en estos huecos y las barras horizontales son colocadas en las juntas entre las hiladas ó en las piezas especiales, esto constituye un sistema constructivo que se emplea con frecuencia en distintos países aun en zonas sísmicas y en edificios de cierta altura. Los requisitos mínimos de refuerzo según la sección 3.4 de las NTCM son:

- a) La suma de cuantía de refuerzo horizontal,  $P_h$  y vertical  $P_v$ , no será menor que 0.002 y ninguna de las cuantías será menor que 0.0007.

Refuerzo horizontal  $P_h = A_{sh} / st$

Refuerzo vertical  $P_v = A_{sv} / tL$

$t$  = espesor del muro

$L$  = longitud del muro

$A_{sh}$  = refuerzo horizontal

$A_{sv}$  = refuerzo vertical

Cuando se emplee acero de refuerzo de fluencia superior a  $4200 \text{ kg/cm}^2$ , las cuantías de acero se podrán deducirse multiplicando por  $4200 / f_y$ .

- b) Todo refuerzo vertical y horizontal deberá estar debidamente recubierto por mortero o concreto. El concreto a utilizar debe de ser de alto revenimiento, TMA de 1 cm., la resistencia a la compresión será mayor a  $75 \text{ kg/cm}^2$ . Los huecos de las piezas tendrán una dimensión mínima de 5 cm. y un área no menor de  $30 \text{ cm}^2$ .

c) Deberá colocarse por lo menos una barra del No. 3 de grado 42 u otro refuerzo equivalente en dos huecos consecutivos en todo extremo de los muros, en las intersecciones entre muros o cada 3m. El refuerzo vertical en el interior del muro tendrá una separación no mayor de 6 veces el espesor del muro ni mayor de 60 cm.

d) Cuando dos muros transversales lleguen a tope, sin traslape de piezas sera necesario unirlos mediante dispositivos que aseguren la continuidad de la estructura.

e) El refuerzo horizontal debe ser continuo, sin traslapes en la longitud del muro y anclado en los extremos. Debe de haber refuerzo consistente en una barra del No. 4 grado 42, o con una resistencia a tensión equivalente, alrededor de toda abertura cuya dimensión exceda 60 cm. en cualquier dirección.

f) La relación altura / espesor de estos muros no será superior a 30.

g) Deberá haber una supervisión continua en la obra que asegure que el refuerzo este colocado de acuerdo con los planos y que los huecos en que se aloja el refuerzo sean colados completamente.

Los requerimientos que se especifican en las NTCM se derivan del contenido en los reglamentos de construcción de E.U.A. , y Nueva Zelanda. Las cuantías de acero vertical y horizontal especificados son los mínimos para evitar una falla de tipo frágil del muro y proporcionar cierta ductilidad (ver ref. 20 ).

Con este tipo de refuerzo horizontal y vertical no se pretende lograr un incremento sustancial a la resistencia de la mampostería, solamente un comportamiento más favorable.

Uno de los aspectos a cuidar en este tipo de muros es la colocación del refuerzo horizontal colocado en las juntas de mortero cuyo espesor deja un recubrimiento muy reducido al acero de refuerzo. El acero de refuerzo debe ser continuo y sin traslapes en toda la longitud del muro, debido a que los esfuerzos por adherencia que se pueden desarrollar son muy bajos por la junta de mortero tan delgada. En muros muy largos será aceptable conectar dos barras mediante ganchos alrededor del refuerzo de castillos intermedios.

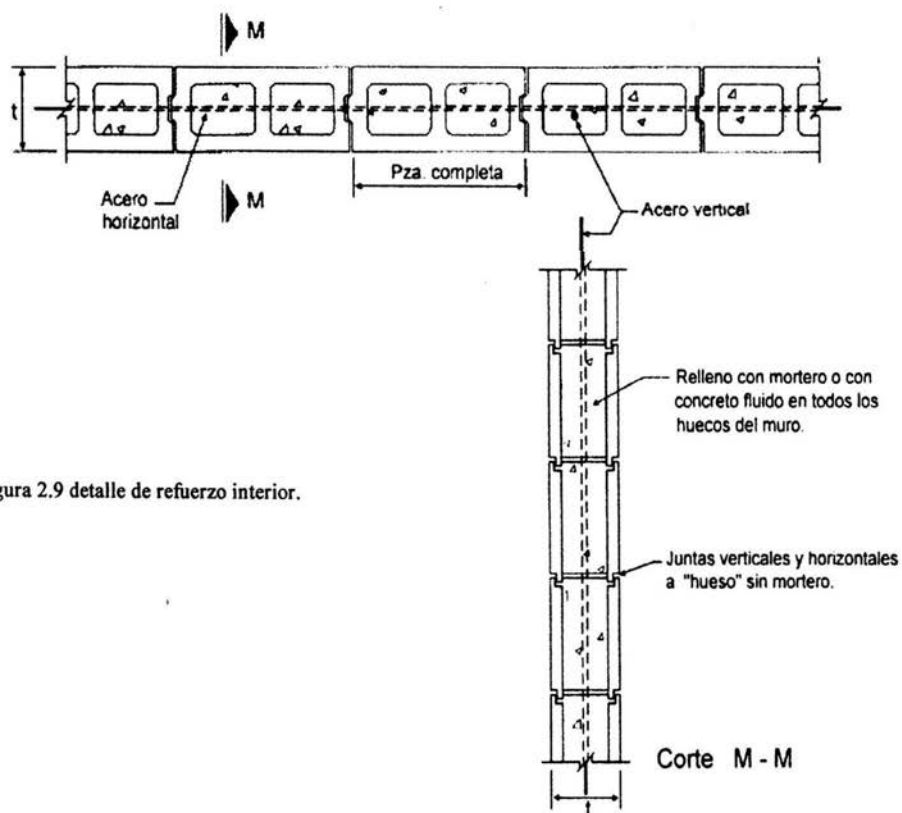


Figura 2.9 detalle de refuerzo interior.

#### 2.5.4 Muros no reforzados

Son aquellos que no cumplen con el acero mínimo especificado para ser incluidos en las categorías anteriores.

## 2.6 Sistemas de piso

Casi en todas las construcciones y principalmente en los edificios, se pueden encontrar dos tipos de subsistemas estructurales mediante los cuales se pueden tomar algunas decisiones independientes, relativas a la solución más conveniente, antes de realizar el análisis de la estructura completa.

Estos subsistemas son el horizontal ( los sistemas de piso), y el vertical, que se refiere a los elementos de soporte. A pesar de esta subdivisión el sistema estructural es una sola unidad y no se puede despreciar la interacción de cada uno de estos subsistemas.

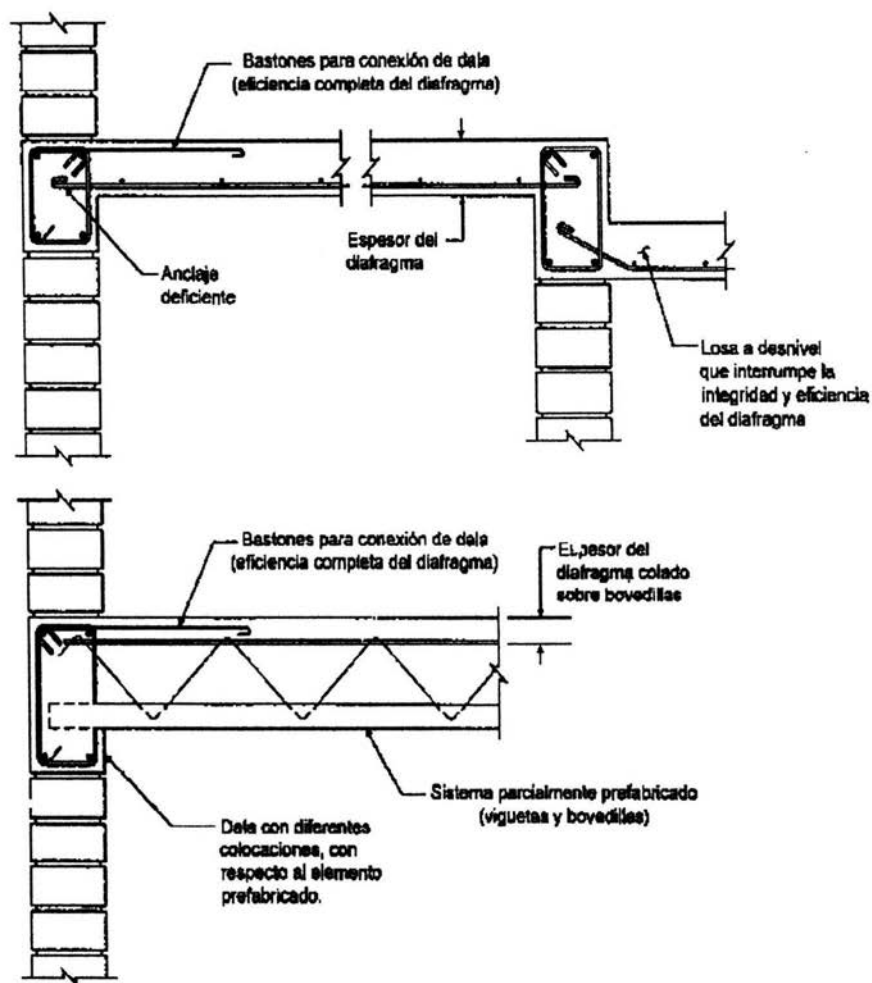
La función estructural de un sistema de piso es de transmitir las cargas verticales hacia los apoyos que su vez las bajan hasta la cimentación. Es necesario que cumpla además la función de conectar los elementos verticales y distribuir entre ellos las cargas horizontales, para lo cual deberá formar un diafragma de alta rigidez en su plano (ver referencia 18).

El desempeño de los sistemas de piso en una estructura debe de tener las siguientes características.

- a) Bajo cargas gravitacionales debe de cumplir con las deformaciones verticales permisibles, durante la operación de colados complementarios en su etapa constructiva, así como en su etapa definitiva, para preservar los materiales frágiles que soportará.
- b) Al recibir el impacto de las cargas vivas, deberá responder con vibraciones aceptables para el usuario. En general, al cumplirse las deformaciones verticales reglamentarias, queda cubierta esta desagradable respuesta.
- c) El desempeño como diafragma horizontal eficiente, para unir entre si a todos los elementos verticales de rigidez , durante la acción sísmica o de viento, es indispensable para garantizar la aplicación de los métodos simplificados y los métodos detallados de análisis.

El efecto de diafragma, supone elementos con pequeñas o nulas deformaciones o distorsiones angulares en su plano. El espesor de este diafragma y la perfecta conexión con dadas, trabes y muros se determina por el estructurista en detalle y recomendaciones constructivas en los planos. Estos sistemas son muy variados desde su concepción unidireccional y bidireccional, así como en sus características geométricas y cualidades constructivas.

a) Losa Maciza



b) Losa prefabricada

Figura 2.10 diferentes sistemas de piso

## 2.7 Cimentaciones

El objeto que debe cumplir una cimentación es transmitir la carga a un estrato del terreno, dando seguridad contra la falla del suelo, limitando el hundimiento medio, así como los hundimientos diferenciales, con el fin de no dañar la estructura que soporta sobre ella, así como los elementos estructurales y no estructurales. En algunas regiones se debe se debe limitar la tendencia al volteo ante la acción de carga lateral (empuje del suelo, viento, sismo, ect). En estructuras sujetas a cargas dinámicas apreciables (como edificios industriales con maquinaria), la cimentación debe evitar, además vibraciones excesivas. Algunas otras características deseables para que una cimentación sea eficiente son (ver referencia 10):

- a) Facilidad de colocación de instalaciones
- b) Procedimiento constructivo fácil, en especial cuando existe la presencia de agua
- c) Previsión para correcciones a futuro, en especial en las zonas de espesores compresibles potentes, de hundimientos a mediano y largo plazo.

De tal forma se puede clasificar las cimentaciones como:

- a) Superficiales: Son aquellas que transmiten carga al terreno por apoyo directo próximo a la superficie y sin sustitución por excavación.
- b) Compensadas: Las que transmiten la carga al terreno por apoyo directo sustituyendo al menos parte de la carga con el peso del suelo.
- c) Sobre compensadas: Aquellas que transmiten carga menor que la que se compensa por excavación.
- d) Profundas: Las que transmiten cargas a formaciones más profundas del suelo a través de pilotes, pilas, puesto que en las capas superficiales no cuentan con las características adecuadas para resistir las cargas.
- e) Mixtas: Las que combinan dos o más de las antes citadas.

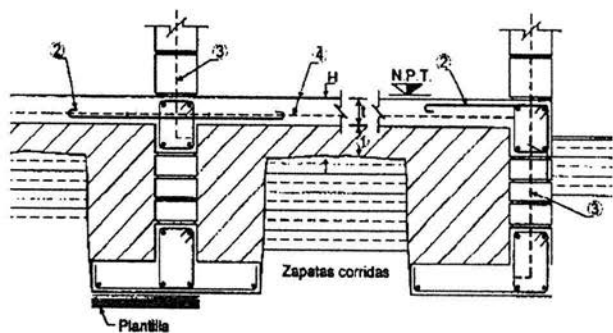
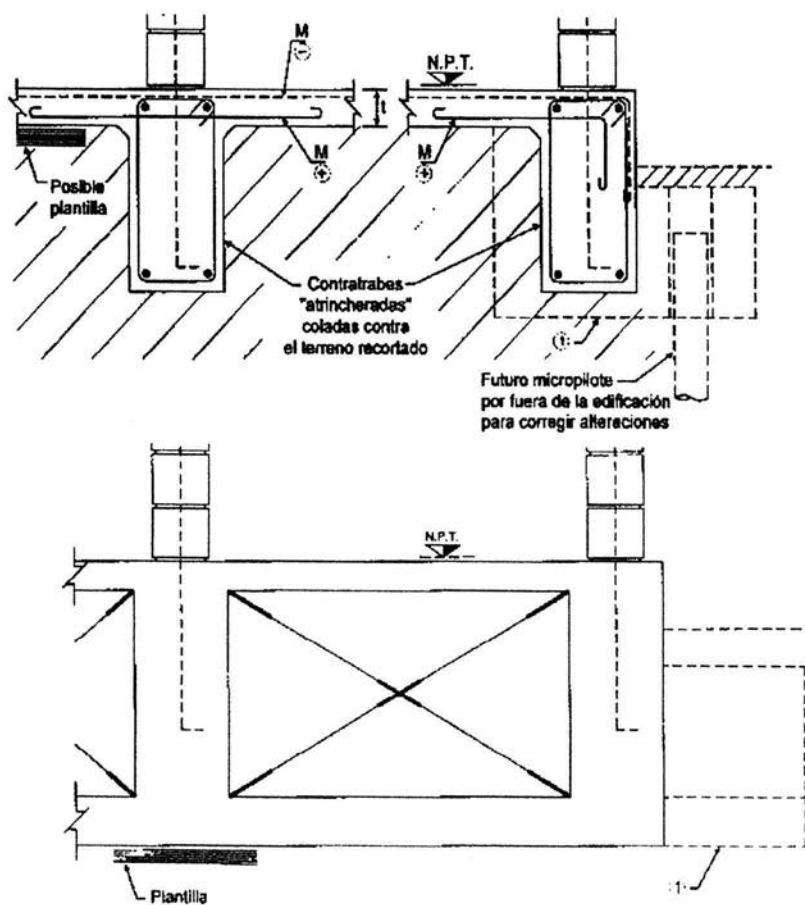


Figura 2.11 Cimentación de tipo superficial.

Figura 2.12 Cimentaciones compensadas



### **3 Comportamiento mecánico en muros de mampostería**

#### **3.1 Comportamiento mecánico de la mampostería no reforzada.**

Las estructuras de mampostería se han construido en distintos lugares del mundo desde hace miles de años. Generalmente, tanto en su fabricación de las piezas como en la construcción, se han utilizado procedimientos artesanales, sin tener necesariamente un conocimiento profundo de su comportamiento estructural.

Por lo que podemos definir como mampostería no reforzada, a aquella que no tiene ningún refuerzo en el interior de las piezas o entre el mortero que sirve para asentar las piezas o el que sirve de recubrimiento. De tal manera que la mampostería no reforzada se conforma de dos elementos: las piezas y el material que sirve para unir a estas, el mortero. ( Ver referencia 13 ).

Las piezas utilizadas para la mampostería, cambian en cuanto a tipos, y a propiedades mecánicas, la materia prima para su elaboración generalmente es el concreto o la arcilla , y el proceso de fabricación de las piezas cambia en cuanto a su nivel de refinamiento. En México, la fabricación de piezas de arcilla de barro recocido continua siendo de tipo artesanal y sin establecer un control de calidad adecuado. Por otro lado la producción industrializada de piezas de arcilla extruida ha demostrado uniformidad y cierta homogeneidad en cuanto a las propiedades mecánicas y dimensionales.

Esta gran variedad de características de los materiales, tanto de las piezas como de los morteros que dificulta una descripción general del comportamiento mecánico de la mampostería. Que hace poco confiable la extrapolación de un tipo de mampostería a otra.

En México los primeros trabajos documentados de investigación experimental sobre mampostería datan de la década de los 60. Desde esta década se han realizado numerosos estudios sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento de la mampostería bajo diferentes solicitaciones de carga.



Para ello, un extenso programa experimental a cargo del Instituto de Ingeniería de UNAM. fue desarrollado de manera casi interrumpida hasta 1980.

Al principio se interesó por determinar las propiedades básicas de la mampostería mediante el desarrollo de ensayos estándar en laboratorio. Por ejemplo ensayos de compresión diagonal en muretes para obtener el esfuerzo cortante ( $V$ ), o ensayos de compresión en pilas, para obtener la resistencia a la compresión de la mampostería ( $f_m$ ). Uno de los estudios más relevantes sobre la determinación de las propiedades índice de la mampostería es: Ensayos estándar para la determinación de las propiedades mecánicas básicas de la mampostería. ( Ver ref.26 ).

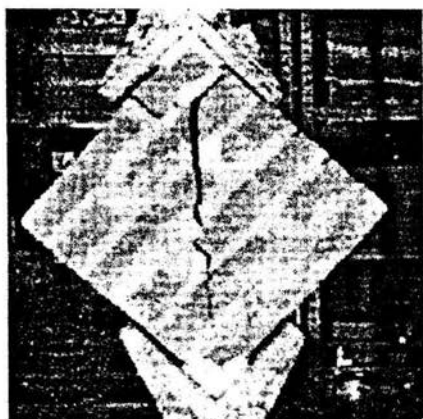


Figura. 3.1 Ensayo de compresión diagonal en muretes .La longitud de los muretes será una vez y media la máxima dimensión de la pieza , y con el número necesario de hiladas para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud.

### 3.1.1 Comportamiento mecánico de las piezas.

La resistencia a la compresión es el parámetro más importante en el comportamiento mecánico de las piezas y que se determina mediante el ensaye directo de una de estas ó de la mitad.

Las resistencias obtenidas de esta forma no es un parámetro uniforme de calidad ya que los resultados obtenidos en piezas de materiales o de geometrías distintas no son comparables y no se relacionan en la misma forma con la resistencia que puedan tener las piezas en un elemento estructural.

Estas variaciones son debidas por las restricciones a las deformaciones transversales, producidas por la fricción con las placas de la máquina de ensaye con la cual se determina la resistencia a la compresión ( Introduce compresiones transversales que afectan la resistencia de la pieza).

La relación altura espesor del espécimen y el material de la pieza, son factores que influyen en esta restricción , por tanto, no ha sido posible encontrar un procedimiento general para estadar los resultados a un caso uniforme.

Por lo que los resultados del ensaye de compresión son estrictamente comparables solo para las piezas del mismo tipo , y la relación entre la resistencia a la compresión de la pieza con el comportamiento estructural del muro puede ser distinto para materiales deferentes ( ver ref. 4,13).

### 3.1.2 Comportamiento mecánico del mortero

Las propiedades mecánicas más importantes de los morteros que influyen en el comportamiento estructural de un muro de mampostería son; La deformabilidad y su adherencia con las piezas.

De la deformabilidad dependen en gran medida las deformaciones totales del elemento de mampostería y también su resistencia a la carga vertical. La adherencia entre el mortero y la pieza define en muchos tipos de mampostería la resistencia por cortante.

Otras de las propiedades de importancia del mortero es la manejabilidad adecuada para que pueda ser colocado en capas uniformes , sobre las que se asienten bien las piezas, evitandose concentraciones de esfuerzos y excentricidades accidentales.

La resistencia a la compresión del mortero no tiene, dentro de un intervalo amplio, una influencia preponderante en el comportamiento estructural de la mampostería sin embargo, el control de calidad del mortero se basa principalmente en esa propiedad que se realiza a través del ensaye de cubos de 5x5 cm. de lado.

El modulo de elasticidad del mortero, determinado en el laboratorio es aproximadamente 1000 veces la resistencia a la compresión. Hay que tomar en cuenta que el modulo de elasticidad obtenido en el laboratorio no corresponde a modulo de elasticidad del mortero, cuando este se aplica en una junta delgada entre dos piezas, debido a las diferentes condiciones de confinamiento, por las distintas condiciones de secado, y por el efecto de absorción de agua ejercido por las piezas (ver ref.13,25).

### 3.1.3 Comportamiento mecánico de la mampostería a compresión.

Para la obtención del índice de resistencia a compresión de la mampostería, así como para estudiar la relación esfuerzo-deformación se utiliza una pila formada por varias piezas sobrepuestas de tabique o block unidas con mortero, hasta obtener una relación altura-espesor de la pila de aproximadamente cuatro, en la cual se reproducen los modos de falla observados en moretes a escala natural. Además de que las proporciones de la pila ayudan a que la maquina de ensaye no introduzca deformaciones transversales significativas que influyan en el comportamiento.

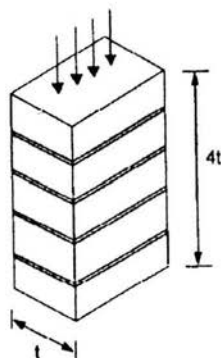
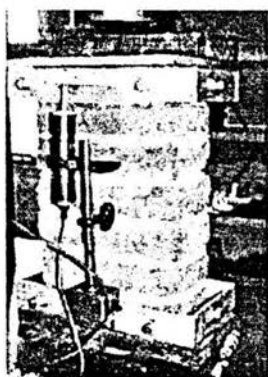


Figura 3.2 Ensayo de una pila de mampostería para determinar la resistencia a compresión.

El comportamiento y fallas ante cargas axiales dependen de los dos elementos que forman las pilas, el mortero y las piezas. Las piezas y el mortero cuentan con características esfuerzo-deformación diferentes; al someter ambos al mismo esfuerzo, el material menos deformable (la pieza), restringe las deformaciones transversales del más deformable (mortero), introduciendo en el esfuerzos transversales de tensión y disminuyendo su resistencia con respecto a la que se obtiene en el laboratorio. La falla más común en estos ensayos es a través de las grietas verticales en las piezas, que se producen por las deformaciones transversales debido a las deformaciones del mortero en las juntas.

Cuando este tipo de agrietamiento aumenta excesivamente la pila pierde estabilidad y falla súbitamente. En las piezas de baja resistencia la falla se produce por aplastamiento y compresión de las mismas piezas.

El aplastamiento del mortero no ocasiona falla cuando los esfuerzos son puramente axiales, ya que este, cuando se aplasta es retenido por la fricción entre él y las piezas, por lo que el conjunto puede soportar cargas superiores. En elementos esbeltos el aplastamiento del mortero puede provocar inestabilidad. (ver referencia 26).

Los diferentes estudios realizados indican que la relación esfuerzo-deformación registrados de pilas en compresión, es prácticamente lineal hasta la falla, que se presenta en forma súbita. Solo para piezas de baja resistencia la curva tiende hacer parabólica y la falla se produce gradualmente.

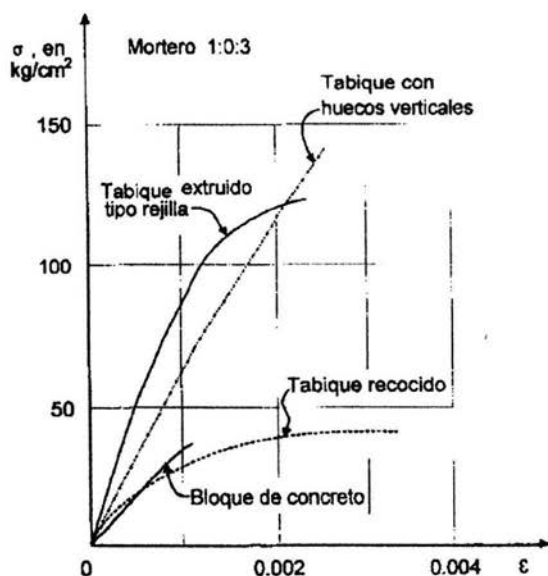


Figura 3.3 Gráfica de curvas esfuerzo deformación para pilas en compresión

En la gráfica anterior la resistencia de las pilas es aproximadamente proporcional a la de las piezas, puede apreciarse una clara diferencia de las piezas fabricadas con cemento, de las labradas con barro, por lo que el mortero no tiene una influencia significativa. De tal manera que la resistencia a la compresión de la mampostería puede estimarse como:

$$f_m = 0.45 f_p \quad \text{para piezas de barro y silico calcareas}$$

$$f_m = 0.60 f_p \quad \text{para piezas de barro.}$$

$f_p$  = Resistencia a la compresión de la pieza

$f_m$  = Resistencia a la compresión de la mampostería

El módulo de elasticidad secante obtenido en los ensayos depende un poco más de la resistencia del mortero, especialmente para las piezas de tabique por el número de juntas.

$$E = 450 f_m \quad \text{para piezas de barro}$$

$$E = 600 f_m \quad \text{para piezas de concreto.}$$

#### 3.1.4 Comportamiento mecánico a tensión diagonal.

Una de las causas por la que un muro de mampostería puede verse sometido a tensión diagonal, es cuando este está sujeto a una carga sísmica o algún otro tipo puede ser cuando se producen asentamientos diferenciales, así cuando existe una distribución poco uniforme de cargas verticales en un muro determinado, este se ve sometido a cargas gravitacionales. Por tal motivo es de vital importancia el comportamiento mecánico de la mampostería no reforzada bajo este tipo de solicitaciones.

Para realizar las pruebas a tensión diagonal se utiliza un muro cuadrado de pieza y media de base. En este ensayo se le aplica una compresión a lo largo de la diagonal del muro y al mismo tiempo se produce un estado de esfuerzos de tensión a lo largo de la diagonal a la que se produce la compresión.

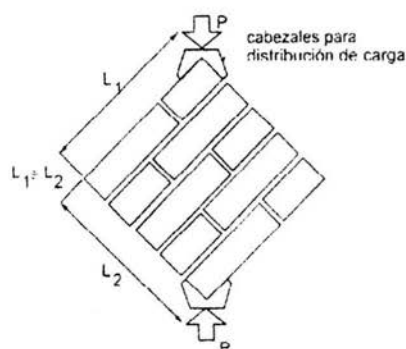
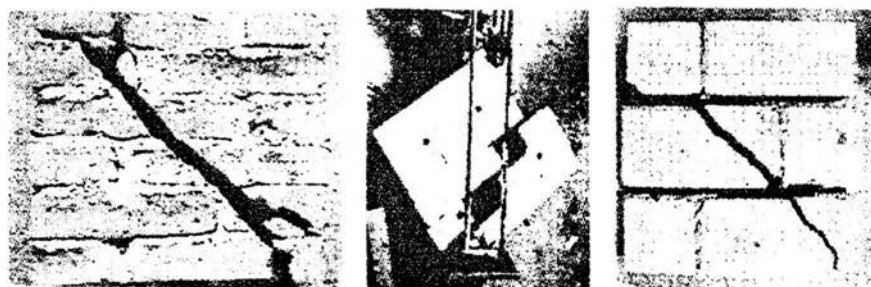


Figura 3.4 Ensayo de compresión diagonal

Hay que señalar que el esfuerzo resistente a tensión es mucho menor que el esfuerzo resistencia a la compresión de la mampostería. Y a pesar de que se trate de un ensayo a compresión diagonal, el modo de falla es prácticamente en todos los casos por tensión diagonal.

Por lo que la falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de las grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Es muy común que las grietas se formen a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión entre la pieza y el mortero, sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero.



a) Falla por las piezas

b) Falla por las juntas

c) Falla mixta

Figura 3.5 Fallas que se presentan en los ensayos de compresión diagonal

En la figura anterior se muestran los principales tipos de falla de la mampostería.

a) Falla por las piezas.

En el primer caso se puede observar que la falla atraviesa las piezas. Esto ocurre generalmente cuando la resistencia a tensión de las piezas es menor en relación con la resistencia y adherencia del mortero con las piezas.

b) Falla por las juntas.

En el segundo caso el agrietamiento se produce en las juntas, esto ocurre cuando la resistencia de las piezas es mayor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las piezas, por tal razón el agrietamiento ocurre en el elemento débil en este caso las juntas del mortero.

c) Falla mixta.

Por último el esfuerzo resistente a tensión de las piezas es semejante a la adherencia entre las piezas y el mortero. Por tal motivo se presenta un tipo de falla mixto en el que el agrietamiento se da tanto en las piezas como en las juntas.

En la siguiente gráfica se muestran curvas típicas carga-deformación en ensayos de muretes cuadrados. La gráfica muestra como las resistencias son aproximadamente uniformes para los distintos tipos de piezas, excepto para las piezas huecas, en las que la resistencia es menor frecuentemente, así mismo se puede observar que la utilización de morteros pobres reduce la resistencia. Se puede ver que el comportamiento se presenta en forma lineal aproximadamente hasta que se produce el primer agrietamiento diagonal.

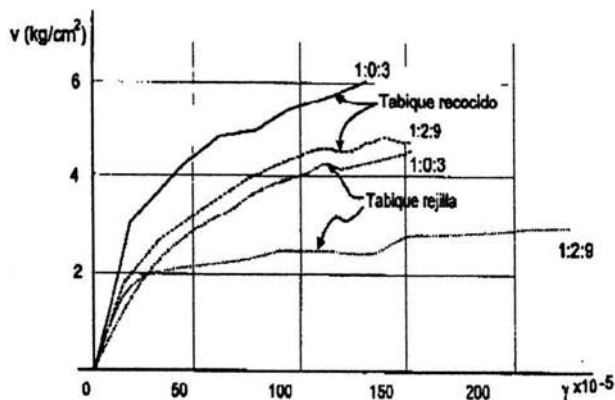


Figura 3.6 Curvas de esfuerzo deformación obtenidas de ensayos de compresión diagonal.



De tal manera se puede precisar que el tipo de mortero y de pieza no influyen significativamente en la deformación a la cual se produce este primer agrietamiento.

$$V = \sqrt{fm}.$$

Después de los resultados de muros sin refuerzo se a visto que para mamposterías en las que no se puede anticipar si el agrietamiento diagonal ocurrirá a través de las piezas la expresión:

$$V = 0.8 \sqrt{fm}$$

Es en general conservadora y que su aproximación es aceptable.

### 3.2 Comportamiento mecánico de las mamposterías confinadas.

La mampostería más utilizada en México es la mampostería confinada. El sistema consiste en rodear perimetralmente al muro con elemento de concreto reforzado (castillos y dalas), La mampostería confinada tiene un comportamiento mecánico muy diferente a la mampostería no confinada (sin refuerzo). La dalas y castillos proporcionan a la mampostería una mejor ductilidad y permiten soportar repeticiones de carga sin un deterioro excesivo.

#### 3.2.1 Comportamiento de la mampostería ante cargas laterales.

En las edificaciones sometidas a esfuerzos sísmicos, las mamposterías están sujetas a deformaciones y esfuerzos por flexión a diferencia de las pruebas de tensión diagonal en la cual se obtiene el esfuerzo cortante resistente del modulo de elasticidad.

Para probar un muro ante cargas laterales, consiste en probar un espécimen en voladizo en el cual se aplican esfuerzos cortantes simultáneamente con esfuerzos a flexión.

En el caso de mampostería confinada por medio de dalas y castillos su comportamiento hasta el primer agrietamiento diagonal es prácticamente el mismo al de los muros de mampostería no reforzada. Lo que implica que la presencia y características de las dalas y los castillos no tienen una influencia significativa en el comportamiento de la mampostería antes de que se produzca el primer agrietamiento diagonal.

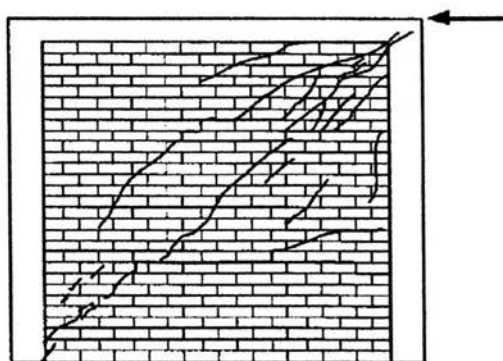


Figura 3.7 Ensaye en voladizo de un muro de mampostería confinada

El esfuerzo cortante que produce el agrietamiento diagonal en un muro sujeto a cargas diagonales y sin esfuerzo de compresión significativa puede estimarse como:

$$V_a = 0.8 V_a C_d$$

$V_a$  = Esfuerzo cortante que produce el primer agrietamiento en un muro sujeto a cargas laterales.

$V_a C_d$  = Es el esfuerzo cortante que produce el agrietamiento diagonal en un ensaye de compresión diagonal.

Después del agrietamiento diagonal existe una distribución de esfuerzos, y el puntal de compresión de la mampostería se incrementa significativamente a las demandas de flexión pero principalmente de cortante en los extremos de los castillos. Este incremento de cortante puede producir la falla del castillo, en las esquinas dando lugar a una reducción drástica de la resistencia del muro. Si la sección y armado del castillo en su parte inferior y superior es capaz de resistir este esfuerzo cortante, el muro puede soportar cargas laterales que provocan generalmente la formación de nuevas grietas con inclinaciones menores a la diagonal.

Esto da como resultado un modo de falla en el cual el sistema puede idealizarse como dos bloques rígidos de muros que actúan sobre dos tramos cortos del castillo. En donde la fuerza lateral es resistida en parte por la fricción y el anclaje mecánico a lo largo de la grieta, además de la resistencia cortante de los castillos en los extremos de la grieta.

La falla puede ocurrir nuevamente en los castillos, o si estos tienen fuerza suficiente en cortante existe reserva de carga importante hasta que los dos tramos cortos de los castillos llegan a articularse, y el conjunto es capaz de soportar deformaciones muy importantes.

Para los estructuristas es importante tomar conciencia de la función principal de los castillos, no es incrementar la capacidad máxima del muro ante cargas laterales sino de aumentar la capacidad de deformación; así como la de atrasar y reducir la degradación de resistencia.

A partir de lo anterior se recomienda el aumento de resistencia por cortante en los extremos superior e inferior de los castillos, el cual se puede lograr reduciendo la separación de estribos a la mitad, en una vez y media la dimensión transversal del castillo.

La falla por flexión ocurre cuando el refuerzo longitudinal del castillo de tensión es escaso y la carga vertical es baja. El comportamiento en este caso es similar al de un elemento subreforzado de concreto. Las grietas producidas por flexión se prolongan a lo largo de casi toda la sección, disminuyendo la rigidez en forma progresiva y finalmente ocurre la falla por fluencia del refuerzo a tensión, por lo que limita prácticamente la resistencia ante cargas laterales en el muro.

En muros confinados la presencia de cargas verticales aumenta la rigidez y la resistencia. Un estudio realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se aplicaron diversos niveles de carga vertical constante a varios muros. En todos los casos se observó que la presencia de carga vertical aumentó la resistencia a cargas laterales, con respecto de un muro idéntico ensayado en carga lateral (ver ref. 1,4 ).

### 3.2.2 Comportamiento mecánico ante cargas laterales reversibles.

Bajo la acción de cargas laterales monotonicas antes del agrietamiento el comportamiento de la mampostería es esencialmente elástico y no se observa ninguna degradación considerable. Después del primer agrietamiento la mampostería no reforzada se caracteriza por la fuerte degradación de rigidez y de resistencia, cuando las cargas son de forma reversible como las que se presentan durante los sismos la mampostería pierde rigidez lateral a medida que se incrementa el número de ciclos y el nivel de deformación lateral.

A parte de la pérdida de rigidez lateral, el agrietamiento de la mampostería produce un estrechamiento importante en los ciclos histeréticos. Básicamente mientras que se incrementa el desplazamiento lateral en una dirección se abren las grietas y cuando cambia en el otro sentido durante el proceso de cerrado de las grietas, el muro tiene una baja de rigidez, una vez que se cierra el muro incrementa su rigidez lateral.

En la siguiente figura además de la falla por fricción el muro puede fallar por tensión diagonal o por deslizamiento.

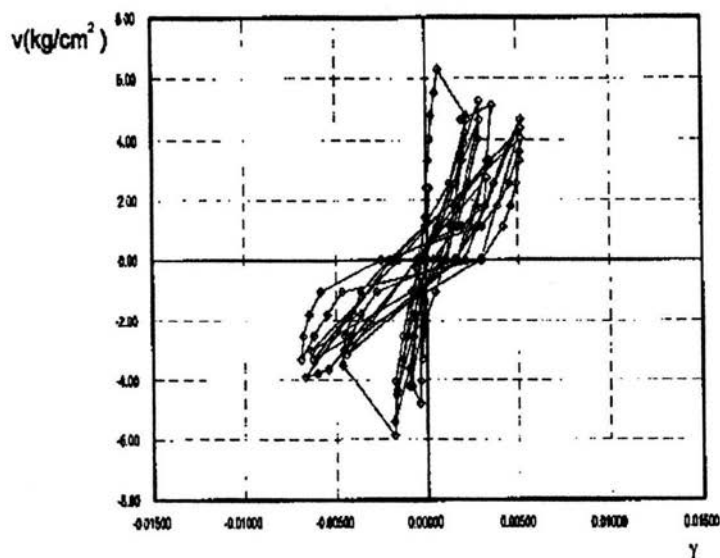


Figura 3.8  
Comportamiento histerético de la mampostería no reforzada.

#### **4. Análisis de estructuras de mampostería.**

El análisis dimensionamiento de estructuras de mampostería se realiza mediante el estudio de las cargas verticales y horizontales.

El análisis riguroso de estructuras de muros y de losas sujetas a cargas horizontales y verticales es complejo por tratarse de sistemas tridimensionales, los cuales no pueden separarse y trabajar con marcos bidimensionales, además de la gran variedad de los materiales de que están fabricados, las holguras, aplastamientos, agrietamientos locales entre mortero y pieza, así como los que existen entre estas últimas y el concreto, hacen que existan deformaciones inelásticas, niveles pequeños de carga lo que altera los resultados de los análisis elásticos. De tal forma es aceptable recurrir a simplificaciones drásticas basadas en consideraciones de equilibrio y en la experiencia de comportamiento adecuado.

##### **4.1 Análisis y resistencia por carga vertical.**

Para realizarse este tipo de análisis por cargas verticales debe tomarse en cuenta que las juntas de los muros y los elementos de piso (losas) se tiene la suficiente capacidad de rotación, debida al aplastamiento del mortero, para liberar al muro de los momentos que podría transmitir la losa debido a la simetría de las cargas verticales (considerando que el muro queda sujeto solo a cargas verticales). Para el diseño se tomaran en cuenta solo los momentos debidos a los efectos siguientes:

a) Los momentos que deben ser resistidos por condiciones estáticas y que no pueden ser redistribuidos por rotación de nudos, como son los momentos debidos a un voladizo que se empotre en el muro y a los debidos a apoyos, debidos al viento o sismo, normales al plano del muro.

b) Los momentos por excentricidad por los que se transmite la carga de la losa del piso inmediatamente superior en muros extremos:

Tal excentricidad se tomara igual a

$$e_e = t/2 - b/3$$

Donde t es el espesor del muro, b es la porción de este, en el que se apoya la loza soportada por este.

Se considera admisible determinar únicamente las cargas verticales sobre cada muro mediante una bajada de cargas por áreas tributarias y tomar en cuenta los efectos de excentricidades y esbeltez mediante los valores aproximados del factor de reducción  $F_E$  que se especifica en las Normas Técnicas Complementarias en Diseño y Construcción de Mampostería cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Las deformaciones de los extremos superior e inferior del muro en la dirección normal a su plano están restringidas por el sistema de piso o por otros elementos.
- b) No hay excentricidades en la carga axial aplicada ni fuerzas significativas que actúen en dirección normal al plano del muro.
- c) La relación altura espesor del muro no excede de 20.

Las principales expresiones para la revisión del muro de mampostería siguiendo (NTCM) son:

Resistencia a cargas verticales

$$Pr = Fr F_E f^*m AT$$

Donde  $Pr$ = carga vertical resistente de diseño,

$Fr$ = factor de reducción de resistencia,

$F_E$ = factor de reducción por excentricidad y esbeltez,

$f^*m$ = resistencia de diseño en compresión de la mampostería,

$AT$ = área de la sección transversal del muro.

Para mamposterías con refuerzo interior que cumpla con (NTCM) se tomara el valor  $f^*m$  corresponde a la mampostería sin refuerzo, incrementado en un 25% pero no más de 7kg./cm<sup>2</sup>.

$F_r$	0.6 para muros confinados o reforzados que cumplan con las NTCM; 0.3 para muros no reforzados.
$F_E$	0.7 para muros interiores que soporten claros que no difieran más del 50%; 0.6 para muros extremos que cumplen con los incisos a, b, c anteriores.

Tabla 4.1 Factor de reducción por excentricidad y esbeltez

Valores de $f^*m$ en $kg/cm^2$			
Tipo de pieza	Mortero I	Mortero II	Mortero III
Tabique de barro recocido	15	15	15
Bloque de concreto tipo A ( pesado )	20	15	15
Tabique de concreto ( $f^*p > 80 kg/cm^2$ )	20	15	15
Tabique de huecos verticales ( $f^*p > 120 kg/cm^2$ )	40	40	30

Tabla 4.2 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería,  $f^*m$ , para algunos tipos de pieza , sobre área neta

#### 4.2 Análisis y resistencia de cargas laterales.

Para la determinación de las cargas laterales debidas a sismo se realizara el análisis, en base a las rigideces relativas a los distintos muros. Esta se determinan tomando en cuenta las deformaciones por cortante y flexión. Para esta ultimas se considerara la sección transversal afectada del muro cuando la relación de carga vertical o momento flexionante produce tensiones verticales. Así mismo debe tomarse en cuenta la restricción que impone la rotación de los muros, la rigidez de los sistemas de piso y techo.

También es admisible considerar que la fuerza cortante que toma cada muro es proporcional a su área transversal, e ignorar los efectos de torsión , de momento de volteo y emplear el método simplificado de diseño sísmico cuando se emplean las siguientes condiciones:

a) En todos los niveles al menos el 75% de las cargas verticales están soportadas por muros ligados entre sí mediante losas monolíticas o por otros sistemas de piso suficientemente rígidos al corte. Dichos muros tendrán una distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales, o en su defecto el edificio tendrá en cada nivel al menos dos muros perimetrales de carga, sensiblemente paralelos entre sí ligados por sus sistemas de piso antes citados en una longitud no menor que la dimensión del edificio en la dirección de dichos muros.

b) La relación entre longitud y ancho de la planta del edificio no deberá exceder de 2.0 a menos que para fines de análisis sísmico se pueda suponer dividida dicha planta en tramos independientes cuya relación entre longitud y ancho satisfaga esta restricción y cada tramo se pueda revisar en forma independiente para su resistencia a efectos sísmicos de acuerdo a la sección 7 de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico.

c) La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base del edificio no excederá de 1.5 y la altura no será mayor de 13 m.

Cuando se utiliza en método simplificado la resistencia al cortante para muros cuya relación entre la altura de entre piso, H, a la longitud L es mayor a 1.33, la resistencia se reducirá multiplicándola por el coeficiente  $(1.33 L/H)^2$ . De esta forma se pueden definir tres métodos para el análisis por carga lateral de estructuras de mampostería:

a) método simplificado.

b) método de análisis estático.

c) método de análisis dinámico.

La fuerza cortante de diseño se determina mediante la siguiente formulas:

Para muros diafragma.

$$V_r = F_r ( 0.85 V^* A_t )$$

La función de un muro diafragma es diferente a la de un muro confinado, el muro diafragma no contribuye a tomar las cargas verticales y actúan exclusivamente como elementos rigidizantes para cargas laterales para muros confinados o con refuerzo interior se tiene:



$$V_r = F_r(0.5 V^* A_t + 0.3P) \text{ pero no mayor de } 1.5 F_r f^* m V^* A_t$$

donde:

$V_r$  = Fuerza cortante de diseño.

$F_r$  = Factor de reducción de resistencia.

$V^*$  = Esfuerzo cortante medio de diseño.

$A_t$  = Área de la sección transversal del muro.

$f^* m$  = Resistencia de diseño de compresión de la mampostería.

$P$  = Carga vertical que actúa sobre el muro sin multiplicarla por el factor de carga.

Para muros con refuerzo interior, la fuerza cortante resistente puede incrementarse 25%, siempre que la cuantía del refuerzo horizontal  $P_h$  no sea inferior a 0.0005 ni al valor resultante de la expresión ( ver ref, 5,9 ):

$$P_h = 0.0002 V^* ( 1+0.2 P/V+A_t ) f_y /4200.$$

Pieza	Tipo de mortero	$V^*$ , kg/cm <sup>2</sup>
Tabique de barro recocido	I	3.5
Bloque de concreto tipo A ( pesado )	I	3.5
Tabique de concreto ( $f^* p > 80$ kg/cm <sup>2</sup> )	I	3
Tabique hueco de barro	I	3

Tabla 4.3 Esfuerzo cortante resistente de diseño para algunos tipos de mampostería, sobre área neta

#### 4.2.1 Método simplificado.

El método simplificado es recomendado para construcciones que cumplen lo referente a condiciones de simetría en la distribución de muros, la existencia de diafragmas rígidos en cada entrepiso, la relación de largo-ancho menor de 2 de la planta del edificio, la relación altura-dimensión mínima de la planta menor de 1.5 y la altura del edificio menor de 13 m. Características que en su mayoría se encuentran en las construcciones a base de muros de mampostería en toda la república Mexicana.

Este método se basa en suponer que la fuerza cortante que se genera por efecto de sismo, en cada entrepiso y en cada dirección, se distribuye en los muros alineados en dicha dirección, en forma proporcional al área de cada muro.

En términos de un comportamiento elástico-lineal. esto equivale a suponer que las deformaciones de los muros son debidas solamente a efectos de esfuerzos cortantes, por tanto la rigidez de cada muro es proporcional a su área transversal.

En términos de comportamiento plástico la hipótesis implica que todos los muros pueden llegar a desarrollar simultáneamente su capacidad resistente, antes del colapso. De acuerdo con este método se desprecian los desplazamientos horizontales, torsiones y momentos de volteo.

El cortante que actúa en cada entrepiso se obtiene por medio de un análisis estático, utilizando los coeficientes sísmicos reducidos de las especificaciones correspondientes en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Sismo.

A partir de este método la resistencia a cortante de la estructura puede ser revisada por alguno de los siguientes conceptos:

a) Asignándole a cada muro una fracción de la carga lateral que es proporcional a su área transversal y compararla con la fuerza cortante de diseño de cada muro.

$$V_R = Fr ( 0.5 V^* At + 0.3 P ) < 1.5 F_R At$$

donde:

Fr = Factor de reducción de resistencia.

V\* = Esfuerzo cortante medio de diseño.

At = Área transversal del muro.

P = Carga axial.

b) Determinando la resistencia a cortante global de la estructura por medio de la ecuación.

$$V_R = Fr At ( 0.5 V^* + 0.3 fa )$$

donde:

At = Sumatoria de las áreas transversales de los muros.

fa = Esfuerzo ocasionado por la carga axial en el entrepiso en cuestión, igual a la carga total dividida entre las áreas de los muros.

#### 4.2.2 Método de análisis estático.

La mayoría de los proyectos que cumplen con los requisitos para la utilización del método simplificado son edificaciones para la vivienda multifamiliar, y por tratarse de proyectos que son bastante repetitivos ameritan que sometan a un análisis de cargas laterales mas refinado como el estático.

Para la utilización de este método se logra generalmente una representación suficientemente precisa mediante marcos esqueléticos en los cuales los muros se representan como columnas anchas, que consiste en formar marcos esqueléticos asignándole a los muros su sección correspondiente y a las vigas se les proporciona una rigidez infinita dentro de la zona de los muros.

En este método de análisis se tiene que tomar en cuenta la rigidez a flexión y a cortante, del elemento. Bajo las hipótesis de este método es posible considerar a los muros como columnas en voladizos, depreciando el acoplamiento de las losas, antepechos o pretiles que existen entre los huecos de las puertas y ventanas.

Para muros cuya relación altura-longitud sea pequeña (menor de 2) esta hipótesis es adecuada, y para muros con relación (mayor de 2), la hipótesis es conservadora ya que para este caso las losas logran acoplar su comportamiento, un claro ejemplo de esto es donde se ubican los pretiles y las puertas.

Cualquier método seleccionado para realizar la modelación de los muros, y con la finalidad de determinar los efectos por sismo, se realiza un análisis estático obteniendo finalmente la distribución de las fuerzas cortantes, que serán proporcionales a la rigidez y a cortante de cada muro, incluyendolos efectos de torsión, además de obtener los momentos flexionantes.

Después de obtener los cortantes que actúan en cada muro se comparan con el cortante resistente de acuerdo a la siguiente expresión.

$$V_R = Fr ( 0.5 V^* At + 0.3 P ) < 1.5 F_R At$$

De acuerdo con los momento flexionante, obtenidos se determina la cantidad de acero necesaria de los castillos (ver ref. 13).

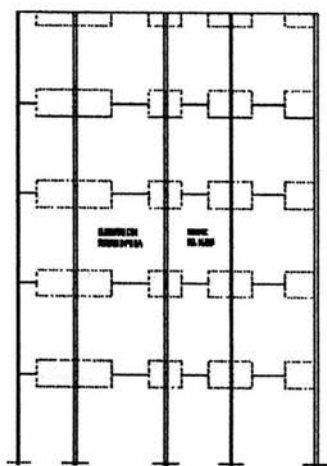
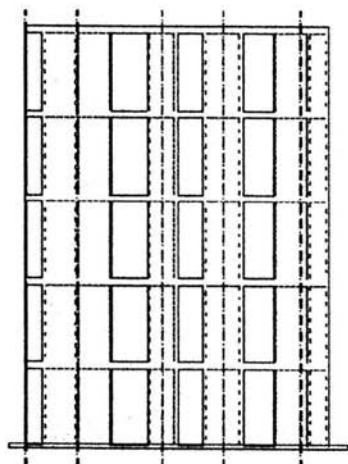


Figura 4.1 Modelo de marco para muros de mampostería utilizando la analogía de la columna ancha.

#### 4.2.3 Método de análisis dinámico.

De acuerdo con la analogía anterior de la columna ancha se puede elaborar un modelo de estructura, por marcos planos o tridimensionalmente. Los elementos estructurales como dalas y losas que funcionan como elementos de acoplamiento se pueden modelar considerando una sección compuesta por un ancho de losa equivalente a cuatro veces su espesor de cada lado.

Para un modelo tridimensional las losas también pueden ser modeladas por medio de una diagonales equivalentes que simulen la rigidez horizontal del sistema de piso. La obtención de las fuerzas por sismo se realizará un análisis dinámico modal espectral, tomando en cuenta los efectos de torsión ocasionados por la excentricidad en rigidez, masa y accidental.

Para la realización de este tipo de análisis es necesario definir adecuadamente los espectros de diseño, así como el factor de comportamiento sísmico Q correspondiente, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño para Sismo.

#### 4.3 Resistencia a la flexocompresión.

La resistencia a flexión y flexocompresión en el plano del muro se calculará , para muros sin refuerzo, según la teoría de resistencia de materiales suponiendo una resistencia lineal de esfuerzos en la mampostería. Se considerará que la mampostería no resiste tensiones y que la falla ocurre cuando aparece en la sección crítica un esfuerzo de compresión igual a  $f^*m$ .

Para muros reforzados con barras colocadas simétricamente en sus extremos , las siguientes expresiones dan valores lo suficientemente aproximados y conservadores del momento resistente de diseño.

$$M_o = F_p A_s f_y d'$$

$A_s$  = Es el área del acero colocada en el extremo del muro.

$d'$  = La distancia entre centroides del acero colocado en los extremos del muro.

Cuando exista carga axial sobre el muro, el momento de la sección se modificará de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$M_r = M_o + 0.3 P_u d ; \quad \text{Si } P_u \leq P_r/3$$

$$M_r = (1.5 M_o + 0.15 P_r) (1 - P_u/P_r) ; \quad \text{si } P_u > P_r/3$$

$d$  = El peralte efectivo de refuerzo.

$P_u$  = Carga axial de diseño total sobre el muro.

$P_r$  = Resistencia de compresión axial.

$F_r$  = Factor de reducción de resistencia.

$F_r$	0.8 si $P_u \leq P_r/3$
$F_r$	0.6 si $P_u > P_r/3$

Tabla 4.4 Factor de reducción de resistencia

## **5. Evaluación y análisis de las grietas en estructuras de mampostería.**

Para realizar la rehabilitación de un edificio generalmente se realizan una serie de evaluaciones y análisis ejecutados por un profesional en diseño. Dependiendo de la importancia del inmueble, así como del tiempo y los recursos, se pueden practicar diferentes niveles de evaluación.

Cabe señalar que el diseñador se enfrenta a un sistema que fue diseñado atendiendo reglamentos anteriores a los actuales en los edificios a rehabilitar. Antes de iniciar cualquier actividad relacionada con la evaluación y el análisis, se requiere de una planeación cuidadosa de tal forma de asegurar que se logrará comprender cabalmente el comportamiento estructural. La evaluación y análisis deben atender la obtención de la curva carga-desplazamiento global de la estructura.

Es conveniente que antes de iniciar las actividades de evaluación y análisis, que el diseñador y el cliente establezcan y documenten los objetivos del proyecto de rehabilitación y en lo particular lo siguiente:

- a) Definir los requisitos del reglamento en vigor para que la estructura existente y la rehabilitada lo satisfagan.
- b) Determinar los objetivos y metas que se deben alcanzar con la rehabilitación.
- c) Identificar los recursos financieros y el presupuesto destinado por el cliente, con el fin de detectar limitaciones a los objetivos y metas.

Es de suma importancia que el cliente tenga claro que los objetivos de desempeño son metas y no garantía de comportamiento.



## 5.1 Evaluación de estructuras existentes.

La evaluación de un edificio es la revisión e investigación técnica de la configuración de la estructura existente, de los diversos tipos de elementos y materiales de la construcción, condiciones y deficiencias, así como cualquier otra característica importante para el análisis estructural.

En esta evaluación se deberá incluir a los elementos fabricados con otros materiales además de los de mampostería.

Una de las dificultades más importantes en la evaluación es alcanzar un nivel de confianza adecuado sobre las condiciones reales del edificio y su comportamiento. El principal objetivo de la evaluación es identificar las variables y características más importantes del edificio para realizar un análisis estructural lo suficientemente completo. Los análisis se harán ante las acciones esperadas que ocurran durante vida útil remanente de la estructura ( ver ref. 6).

### 5.1.1 Registro de construcción y diseño.

Es de suma importancia recuperar todo el material disponible sobre el diseño, construcción y características del suelo, así como de las modificaciones posteriores. En esta investigación se incluyen cálculos, especificaciones, normas, planos de diseño y de taller, inspecciones , modificaciones al proyecto, determinación de propiedades de los materiales, como cualquier otra evidencia que nos ayude a recrear el diseño original y la construcción actual.

### 5.1.2 Inspección

La inspección de un edificio es fundamental para confirmar que registro documental recuperado (planos arquitectónicos, estructurales ), refleja muy de cerca las condiciones existentes, así como para identificar la presencia de daño ocasionado por acciones anteriores. En la inspección de se debe revisar fundamentalmente:

a) configuración.

b) Condición.

c) Deficiencias de la estructura.

En la configuración de la estructura se incluye la verificación de las dimensiones del edificio, el arreglo de los elementos y las propiedades mecánicas de los materiales. Las dimensiones de los elementos son generalmente fáciles de obtener ; sin embargo los armados son prácticamente imposibles de identificar sin retirar algún recubrimiento.

La calidad de los registros obtenidas determinara la profundidad de la inspección de la configuración estructural. En la inspección de la condición estructural se incluyen, la evaluación de puntos de aplicación de carga, signos de deterioro e influencia del ambiente. Si no hay claras señales de daño, es útil recurrir a técnica de ensaye destructivo y no destructivo.

Se debe prestar suficiente atención a la condición actual de las conexiones entre, conexiones y muro de mampostería, entre muros y sistemas de piso. Las conexiones tienen funciones importantes en la transmisión de carga y en la disipación de energía. En estos lugares es fundamental realizar una combinación de inspecciones visuales, retiro de recubrimiento, y evaluaciones no destructiva para localizar el refuerzo e identificar su diámetro.

De tal forma es prioritario cuantificar las propiedades mecánicas de los materiales a través de inspecciones visuales y ensayos. En particular en aquellos muros que presenten las mayores acciones, así como los que estén expuestos a ambientes locales agresivos o cerca de las cimentaciones.

Una etapa necesaria en el proceso de evaluación es la revisión de las deficiencias de una estructura. Estas pueden ser el resultado de irregularidades ( en planta o elevación), elementos o regiones de las estructuras más débiles que otras, presencia de edificios vecinos, materiales de construcción inapropiados, un sistema estructural mal concebido, detalles inadecuados, amenaza por condiciones del suelo, etc (ver ref. 13).

### 5.1.3 Materiales.

La determinación de las propiedades de los materiales podrá efectuarse mediante procedimientos no destructivos o destructivos, siempre que por estos últimos no se deteriore la capacidad de los elementos estructurales. En caso de que se tenga daños en la cimentación o modificaciones en la estructura que incidan en ella, será necesario verificar, las características del subsuelo mediante un estudio geotécnico.

### 5.2 Evaluación de grietas.

Una grieta o fisura puede tener múltiples orígenes. Algunas veces una simple inspección puede darnos una pista, pero en la mayoría de los casos para detectar las causas reales hay que realizar una investigación que requiere unir datos aislados, observaciones, comprobaciones simples o más complejas, unidas al razonamiento lógico y crítico para determinar la causa del defecto.

Es de vital importancia tener en cuenta que un muro es un componente de una construcción , se mueve permanentemente, esta expuesto a absorción, retención o evaporación de humedad, sufre variaciones dimensionales y sollicitaciones estructurales de permanente variabilidad (ver ref. 28 ).

Siendo las grietas o fisuras la causa de falla en la mampostería más frecuente ( Entendiendo como falla la alteración del nivel de desempeño o el dejar de cumplir una función ) y no el colapso. Las grietas pueden indicar un posible colapso, alterar la apariencia arquitectónica, o servir de entrada para la lluvia y demás agentes agresivos. Una grieta aparece cuando las deformaciones del muro exceden la deformación de agrietamiento de la mampostería.

Hay muchas clasificaciones e grietas desde las más simples que las clasifican por su forma, una de ellas la de Eldridge.H.J. y las denomina como:

- a) Vertical
- b) Horizontal
- c) Diagonal

Otra clasificación de las grietas es de acuerdo con el ancho, aun así no existe una clasificación universal y absoluta de la anchura de las grietas para poder decir que tan peligrosas son, ya que depende de la función de la estructura, tipo de acción, forma de la grieta, entre otras.

Una clasificación de anchura de las grietas según el nivel de la exposición de la estructura se presenta en la siguiente tabla.

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		$AG > 0,60$

Tabla 5.1 Clasificación de las grietas según el nivel de exposición de la estructura.

Así mismo en 1955 Rodríguez y Castrillon han expuesto criterios para determinar el grado de daño en muros de mampostería por sismo.

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

Tabla 5.2 Criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería después de un sismo.

Es importante tener en cuenta que el coeficiente de variación de la anchura de las grietas en estructuras de mampostería es del orden del 40%; esto significa que la anchura máxima puede ser hasta dos veces la anchura media en un solo elemento.

Para determinar el comportamiento de la estructura, el diseñador debe de registrar:

- a) Patrón de grietas ( horizontal, vertical, inclinada).
- b) Longitud.
- c) Anchura (variable ó variable uniformemente).
- d) Profundidad.
- e) Edad.

La forma más fácil de medir el ancho de una grieta, es mediante la comparación de la grieta con marcas de diferentes anchos, pintados en una lamina plástica llamado grietómetro.

Para mediciones más precisas, o bien a largo plazo, es conveniente el uso de transductores de desplazamientos conectados a equipos electrónicos de captura de datos.



Figura 5.1 Comparador plástico de grietas (grietómetro)

Es de suma importancia en una evaluación de una estructura de mampostería determinar si la grieta esta activa o es pasiva. Es decir que las activas presentan desplazamientos e incrementos en sus anchuras, mientras que las pasivas no cambian ni en su anchura ni en su longitud.

En la actualidad hay por lo menos tres métodos para determinar o detectar movimientos en las grietas o fisuras:

- a) Mediciones periódicas con ayuda de láminas plásticas. Las mediciones se hacen sobre la misma grieta y en lugares predeterminados con anterioridad , se realizan del orden de tres a cuatro por grieta.

b) Testigos de yeso.

Con este método es conveniente registrar la fecha de la colocación y tener cuidado de que los testigos no se agrieten por la contracción del fraguado del yeso.

c) Monitores plásticos de grietas.

Se refiere a un aparato de plástico que consta de dos piezas, que se adhieren una de cada lado de la fisura o grieta. La pieza de plástico translúcida, tiene marcado un par de ejes ortogonales, la de plástico opaco, que se coloca bajo la anterior, tiene marcada una cuadrícula graduada.

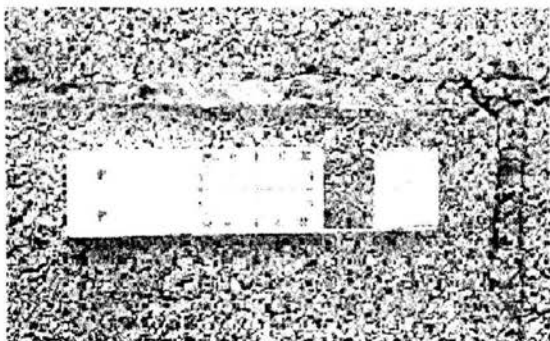


Figura 5.2 Monitor plástico para registrar la abertura de las grietas.

El monitor se instala de tal forma que los ejes ortogonales coincidan con el cero de la cuadrícula graduada. De tal forma que al moverse la grieta los ejes ortogonales marcan la longitud del desplazamiento tanto vertical como horizontal.

Algunas de las causas más comunes de agrietamiento en muros de mampostería son las siguientes.

**Lugar: muros diafragma en marcos estructurales**

*Tipo de grieta:* verticales en el centro del muro, siendo de mayor anchura en la parte media.

*Causa:* restricción al movimiento vertical de la parte superior e inferior de los muros.

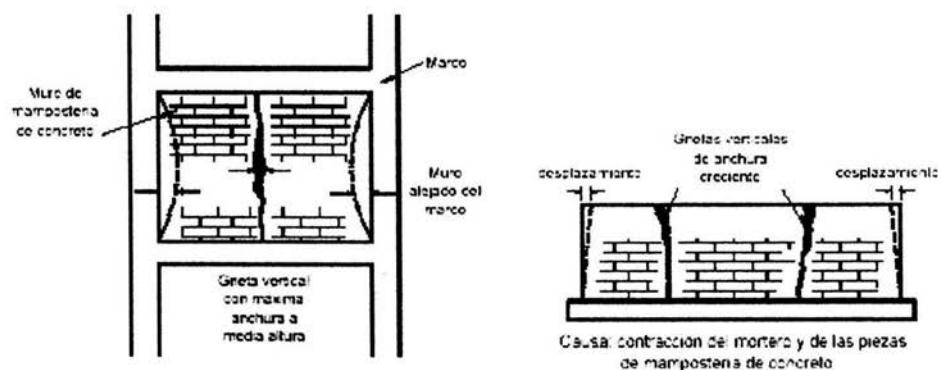
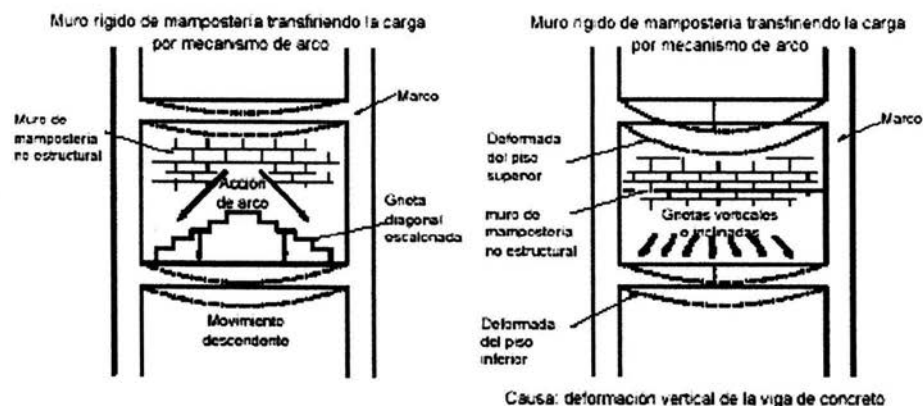


Figura 5.3 Efecto del asentamiento en la cimentación o del levantamiento del suelo

**Tipo de grieta:** en escalera, partiendo de las esquinas inferiores y con anchura constante.

**Causa:** el muro de mampostería es obligado a bajar debido a la flexión de vigas superior e inferior.

Figura 5.4 Grietas formadas por la deformación vertical excesiva de las vigas



*Tipo de grieta:* verticales e inclinadas en la parte inferior del muro, siendo de mayor anchura en la parte más baja.

*Causa:* la viga superior se ha flechado más que la inferior, aplicando al muro esfuerzos de compresión.

**Lugar: juntas de mortero**

*Tipo de grieta:* verticales y horizontales, con anchura constante en juntas de mortero de gran espesor.

*Causa:* contracción por secado debido al alto contenido de cemento que tiene el mortero empleado en juntas anchas con un contenido de agua y cal menor que el normal.

*Tipo de grieta:* verticales y horizontales de anchura constante.

*Causa:* movimiento relativo entre piezas y mortero; generalmente, asociado a cambios térmicos.

*Tipo de grieta:* horizontales y verticales.

*Causa:* pandeo de la escalerilla (o acero de refuerzo en la junta) debido a movimientos de muros adyacentes, lo que provoca agrietamientos y desconchamientos del mortero.

*Tipo de grietas:* varios.

*Causa:* deterioro de la adherencia debido a agentes químicos o a limpieza de mampostería con ácidos.



**Lugar: pieza desconchada**

*Tipo de grieta:* horizontales y verticales de anchura constante en lugares con ciclos de congelación y deshielo.

*Causas:* la expansión volumétrica del agua cuando se congela (9 por ciento) produce tensiones que se traducen en grietas y desconchamiento de piezas.

*Tipo de grietas:* de anchura constante y desconchamiento de piezas en zonas húmedas de edificios

*Causas:* cristalización de sales solubles en la mampostería que producen expansiones internas. Este fenómeno ocurre cuando se han aplicado selladores a los muros que, aunque permiten el paso de vapor de agua, impiden la salida de las sales.

**Lugar: bloques de concreto**

*Tipo de grieta:* anchura constante en bloques y juntas de mortero

*Causa:* contracción por secado de bloques de concreto, o bien por secado de los bloques que fueron colocados mojados.

**Lugar: varios**

*Tipo de grieta:* de varias anchuras en piezas y juntas

*Causa:* el agua que permea por los muros puede causar asentamientos diferenciales y deterioro en los materiales adyacentes.

**Lugar: juntas de expansión**

*Tipo de grieta:* verticales con anchura constante entre juntas de expansión o cerca de ellas

*Causa:* pocas juntas de expansión que obligan al sellador a salir y a agrietar la mampostería.

**Lugar: muros sobre cimentaciones o losas**

*Tipo de grieta:* horizontales con anchura constante cerca de la parte inferior de los muros

*Causa:* los muros sobre cimentaciones de concreto se expanden mientras que la cimentación (losa) se contrae.

*Tipo de grieta:* verticales con anchura variable, mayor en la parte superior y partiendo del fondo del muro

*Causa:* asentamiento de las esquinas de la cimentación (losa) o levantamiento del suelo cerca del centro del muro.

*Tipo de grieta:* diagonales escalonadas a partir de la esquina de aberturas de puertas o ventanas, con anchura mayor cerca de la abertura

*Causa:* asentamiento del centro de la cimentación (losa) o levantamiento del suelo en los extremos del muro.

*Tipo de grieta:* diagonales escalonadas en ambas esquinas de aberturas, siendo menor cerca de la abertura

*Causa:* asentamiento de un extremo del muro.

**Lugar: cerca de combinaciones de piezas claras y oscuras (cocidas de manera distinta) o de diferentes materiales en el mismo muro**

*Tipo de grieta:* horizontales y verticales de anchura constante

*Causa:* diferentes coeficientes de expansión térmica entre piezas claras y oscuras, o entre piezas de diferente material, lo que produce deformaciones relativas y agrietamiento.

**Lugar: cerca de árboles**

*Tipo de grieta:* anchura y tipos variables, cerca de cimentaciones

*Causa:* movimiento de la cimentación debido a las raíces de los árboles. En suelos arcillosos, los árboles pueden secar el suelo, provocando asentamiento de la cimentación.

**Lugar: edificios cercanos a obras**

*Tipo de grieta:* anchura y tipos variables. cerca de cimentaciones

*Causa:* aumento en la profundidad del nivel freático debido a la construcción, lo que se traduce en consolidación del suelo y, consecuentemente, en asentamiento de los edificios vecinos.

*Tipo de grieta:* varios tipos, tamaños y localización

*Causa:* hincado de pilotes, explosiones o impactos similares.

Lugar: **parapetos**

*Tipo de grieta:* verticales y horizontales con anchura constante

*Causa:* a) Diferentes niveles de absorción y expansión térmica al estar expuestos a mayores cambios climáticos que los muros inferiores. b) Reducida o nula restricción fuera del plano(ver ref.13).

### 5.3 Pruebas a muros de mampostería.

Los métodos de evaluación y ensaye en sitio, de estructuras y mampostería son de dos tipos destructivos y no destructivos. Algunos requieren la extracción o remoción de probetas. A diferencia de otros que dejan huecos pequeños o alguna otra marca en la estructura. La extracción de algunas probetas, como los corazones, puede dañar algunos de los acabados interiores. Algunas otras pruebas producen ruido, polvo, humedad, radiación y desperdicios o cascajo.

Con algunos de los métodos se puede medir directamente la resistencia. Otras requieren una serie de correlaciones en pilas o corazones para calcular la resistencia.

Condición	Método de prueba																		
	Inspección visual	Martillo de rebote	Extracción	Barnizado	Penetración	Ensayes a corte	Corazones	Adh. en el mortero-pieza	Globos planos	Velocidad de pulso	Impacto eco	Magnético	Radiografías	Termografía infrarroja	Micromedias	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								X
Uniformidad en el plano	X	X	X	X	X				X	X									
Deformabilidad en el plano									X										X
Nivel de esfuerzos en el plano									X										
Localización de grietas	X									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	X					
Vacios en la mampostería	X									X	X		X	X					
Corrosión del acero de refuerzo	X														X		X		
Problemas de durabilidad	X									X	X				X			X	

Tabla 5.3 Métodos de evaluación y ensayos en sitio.

### 5.3.1 Inspección visual

Consiste en realizar una inspección directa de las grietas, determinar los efectos del intemperismo, corrosión, deterioro del mortero, eflorescencia y algunos otros defectos. En este método pueden incluirse las mediciones de asentamientos diferenciales, así como el uso de equipos de fibra óptica para detectar las grietas internas.

### 5.3.2 Martillo de rebote.

En esta prueba se utiliza un martillo de acero accionado por resorte o un martillo colocado en un péndulo para determinar la uniformidad en la mampostería y para detectar las zonas más débiles de los muros de mampostería o de baja calidad.

El martillo de rebote consiste esencialmente en un pistón de acero endurecido que es accionado por un resorte conectado a una masa. La herramienta se coloca contra la superficie de la mampostería y se descarga el resorte empujando la masa contra la mampostería. La masa rebota de la superficie; la distancia de rebote es medida en una escala arbitraria. Existen tres tipos de martillo

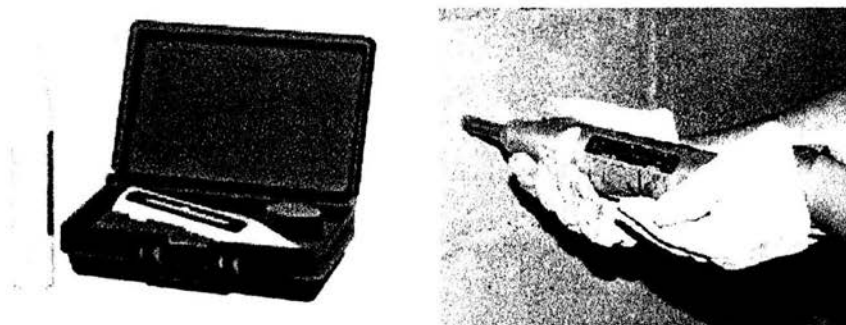


Figura 5.5 Martillo de rebote o esclerómetro.

a) El N que es recomendable para piezas de arcilla, sin embargo puede dañar las piezas de concreto o las piezas antiguas.

b) El L, que es para piezas suaves.

c) El P (tipo pendular), que generalmente se emplea para las juntas de mortero o materiales de baja resistencia.

Los modelos más recientes constan de registradores automáticos de las lecturas, sea mediante las impresoras de papel o de memoria digital.

Por lo general la determinación de la dureza de la superficie se debe hacer lejos de las orillas, aberturas, piezas desconchadas o agrietadas; en ocasiones, es necesario desbastar la superficie para obtener un plano liso y realizar la prueba.

Es recomendable realizar las pruebas de modo que el martillo sea colocado de forma ortogonal a la superficie de la mampostería. Es recomendable practicar la prueba 3 ó 4 veces en cada uno de los puntos de interés hasta que el valor medido se estabilice.

Posteriormente, se aplican 10 pruebas más sin retirar la punta del pistón de la mampostería. Se recomienda descartar las cinco lecturas más bajas. El número de rebote se calcula como la media de las cinco lecturas mayores.

Las lecturas se pueden presentar en gráficas con líneas de igual valor. Este tipo de gráficas es útil para identificar las tendencias generales de la dureza superficial. La correlación entre el número de rebote y la resistencia a la compresión es bajo. El martillo de rebote permite conocer la condición general de la superficie.

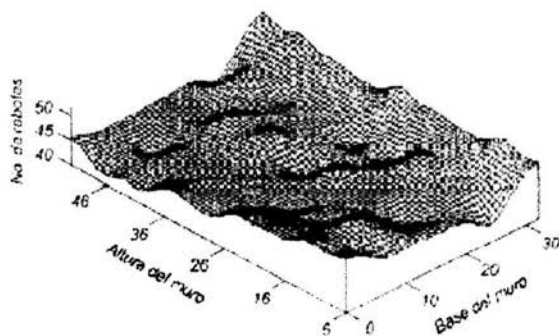


Figura 5.6 Gráfica de aplicación del martillo de rebote para determinar la uniformidad de la superficie de un muro de mampostería.

### 5.3.3 Extracción.

Las pruebas de extracción sirven para determinar la resistencia a tensión o cortante de las anclas o fijadores instalados en la mampostería . La ancla se instala, fijada con resinas epóxicas en a pieza o en la junta.

La fuerza medida se puede relacionar con otras pruebas que estiman la resistencia a tensión, también se puede emplear para evaluar la uniformidad del material.

La resistencia a la extracción del fijador se mide de la fuerza aplicada en el extremo libre del fijador, ya sea de tensión directa, de corte ( perpendicular al eje del fijador ) o combinada tensión- cortante, según la función del fijador.

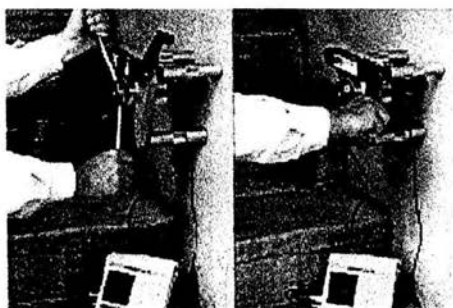


Figura 5.7 Equipo utilizada para la extracción de los fijadores.



Figura 5.8 Muestra de la falla común de extracción de un fijador dentro de la mampostería . La fuerza de extracción y el cono de mampostería formado son indicadores de la resistencia de esta.



#### 5.3.4 Barrenado.

En esta prueba se mide la energía consumida para perforar una junta de mortero con una broca. generalmente se usa para determinar la uniformidad de las juntas y para determinar las áreas de mortero deteriorado.

#### 5.3.5 Penetración.

En esta prueba se determina la resistencia de fijadores o probetas de acero a penetrar en la mampostería. Con lo cual podemos conocer la uniformidad de las piezas y de las juntas. La penetración de las probetas se ve afectada por la resistencia, rigidez y la densidad del material que rodea la zona, como por la deformación elástica de la masa, en que son disparadas las probetas.

Estas pruebas son más útiles para determinar la resistencia del mortero que la resistencia a compresión de la mampostería.

El equipo para la realización de esta prueba es una pistola que dirige una carga (empuje neumático producido por un cartucho de pólvora o bien producido por un resorte comprimido ) contra el espécimen en estudio.

El equipo usado en mampostería es igual al equipo que se utiliza para realizar las pruebas en concreto solamente se modifican las probetas de acero. Las pistolas constan de un dispositivo de seguridad para evitar accidentes, únicamente se pueden disparar presionando la pistola firmemente contra la superficie de la mampostería. Siendo de vital importancia la utilización de equipo de protección para la cara y los ojos, ya que es muy común que la superficie de mampostería se desconche. El equipo consta de dos niveles de potencia:

- a) El bajo, para mortero y piezas suaves con resistencias a la compresión de  $140 \text{ kg/cm}^2$ .
- b) El alto, para piezas de arcilla y mampostearías con huecos rellenos de mortero.

La probeta consta de un cilindro de acero endurecido de 6.4mm de diámetro dentro de una funda de plástico. La penetración se mide con micrómetro de precisión de 0.002 mm.

Algunas de las restricciones para realizar esta prueba son las siguientes: se debe realizar sobre partes sólidas de las piezas, y no sobre las paredes de los alvéolos.

La superficie debe ser relativamente lisa, de modo que pueda asentarse adecuadamente la pistola. El número de ensayos depende de la zona en estudio.

Para el concreto se considera que una prueba está compuesta de la media de penetración de tres sondas o de seis fijadores. Las sondas se deben separar al menos 180 mm, mientras que los fijadores entre 50 y 150 mm.

Penetrada la sonda, se debe revisar con un martillo, que no haya quedado suelta, descartando aquellas que quedaron sueltas o que no penetraron en forma perpendicular a la superficie. Para medir la profundidad de la penetración, se debe retirar los fijadores. Es evidente que los fijadores de acero penetran más en materiales débiles, suaves o porosos que en los duros o más densos.

De forma análoga penetran más en mampostería deteriorada que en sana pudiendo de esta forma determinar áreas de materiales deteriorados o de baja calidad.

Los ensayos de laboratorio muestran una correlación con la resistencia a la compresión que varía entre 0.6 a 0.95 (Suprenant y Chuller 1994).

### 5.3.6 Corte en plano

Se puede decir que es uno de los métodos más aceptados para determinar la resistencia al cortante de la mampostería. En él se mide la resistencia al cortante rasante de una junta de mortero, que se desplaza horizontalmente a una pieza de mampostería con un gato hidráulico (o bien con gato plano).

Este método muy popular para determinar la resistencia sísmica de las edificaciones principalmente en el estado de California en los E.U.A. (De mampostería Simple). Sin embargo los resultados no deben interpretarse como valores absolutos de la resistencia al corte de la mampostería.

Los resultados de resistencia al corte obtenida mediante este método se puede extrapolar a los demás elementos de mampostería, puesto 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 tensión de las piezas. Los valores de la resistencia obtenidos de este tipo de pruebas no podrán utilizarse para predecir la capacidad de resistir cargas laterales de muros esbeltos, cuya falla se da por flexión, ni por muros cuya falla por tensión diagonal se caracteriza por grietas inclinadas a través de piezas y de juntas indistintamente.

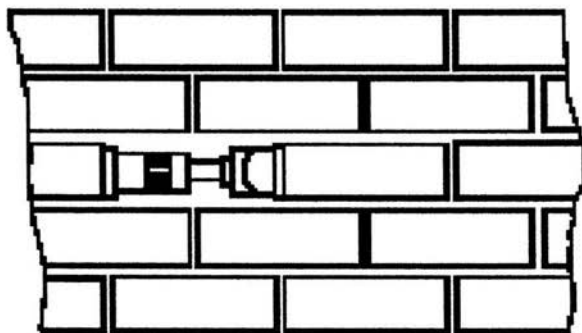


Figura 5.9 Prueba de corte en el sitio.

El equipo que se utiliza para la realización de esta prueba es: un taladro, broca para retirar el mortero, cinceles martillos. Un gato hidráulico bien calibrado, bomba hidráulica manual con manómetro y caratula, placas de acero de 13 mm. de espesor, rotula para aplicar la carga, laines y equipo de protección. En ocasiones es conveniente medir el desplazamiento de la pieza cargada, mediante un transductor de desplazamiento.

Las normas establecen que se haga una prueba por cada 150 m<sup>2</sup> de superficie de muro o al menos una por muro o eje de muros que resistan carga lateral. La prueba se debe hacer en lugares representativos de las características de los materiales, calidad de mano de obra, intemperismo y deterioro. Se debe de evitar las piezas rotas, o lugares donde las juntas no sean paralelas.

Para poder realizar esta prueba se debe de retirar una pieza, donde se alojara el gato hidráulico, removiendo el mortero superior o inferior que queda en el hueco, así como el mortero vertical en el extremo hacia donde se moverá la pieza cargada. Una vez que se instala el gato, se procederá a alinear e instalar una placa de 13mm. entre este y la pieza por cargar, se recomienda instalar adicionalmente una rotula de acero para evitar cargas concentradas por mal alineamiento del gato.

### 5.3.7 Corazones.

En esta prueba se mide la resistencia a cortante- adherencia de las piezas y el mortero mediante el ensaye a compresión de corazones extraídos con diámetros cercanos a la longitud de una pieza ( usualmente se realiza en corazones de 20cm. de diámetro).

Generalmente se utiliza este método cuando la prueba de empuje en plano o corte en plano no es aplicable ya que el modo de falla esperado o registrado es por tensión diagonal de la mampostería. Los especímenes extraídos son cargados diametralmente de modo que la línea de acción de la carga forma un ángulo de  $15^\circ$  con respecto de la junta diametral del corazón. El método ha caído un poco en desuso por lo difícil que es obtener corazones inalterados en mampostearías con morteros débiles ( regularmente de cal) en estos casos se recomienda usar el método de corte en plano.

La resistencia media a cortante se determina como el cociente de  $P \cos \alpha$  y el área de la junta, donde  $P$  es la carga aplicada y  $\alpha$  es el ángulo entre la junta diametral y la línea de acción de  $P$ .

Es recomendable que el número de corazones por extraer sea igual al número de pruebas de corte en el plano en el muro. En este método generalmente se ha aplicado en muros de mampostería de barro.

Las limitaciones de este método son principalmente la afectación estética de la estructura del edificio, la dificultad de obtención en mampostearías débiles, como los elevados coeficientes de variación incluso mayores al 30%. Algunas veces resulta conveniente extraer especímenes en forma de murete para ser ensayados a compresión diagonal.



Figura 5.10 Muestra de extracción de corazones

### 5.3.8 Adherencia ( mortero-pieza).

La adherencia (mortero-pieza) se puede obtener mediante un sencillo aparato donde se aplican esfuerzos de flexión a la junta de mortero. El aparato consta de una mordaza placas de acero y placas de neopreno debido a las irregularidades de la pieza y un par de tornillos para ajustarla, además de una llave o maneral con torquímetro con el cual se aplica un momento. En realidad se aplica una carga axial y un momento flexionante con respecto al eje de la pieza ( y de la mordaza). El calculo de esfuerzo máximo de tensión se hace aplicando la formula de la escuadría.

Para efectuar este ensaye se requiere retirar las piezas superiores de la pieza a cargar, como las juntas verticales, para no afectar la adherencia.

Se recomienda que se el mismo torque a los tornillos de la mordaza en todas las pruebas a realizar y que la carga vertical se aplique en el mismo punto del torquímetro durante el ensaye, y que se registre su ubicación, puesto que es indispensable para el calculo de la adherencia.

La adherencia es afectada por múltiples factores, entre ellos la mano de obra y el medio ambiente, por lo que es necesario un amplio muestreo para la obtención de un nivel de confianza razonable de los resultados.

Por lo regular se ejecutan entre 5 y 10 pruebas por cada área que es investigada.

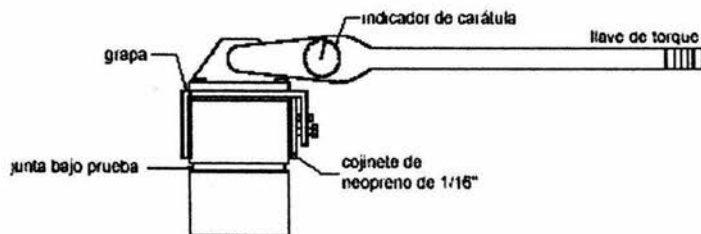


Figura 5.11 Aparato para la prueba de adherencia en sitio.

### 5.3.9 Gatos planos

Por medio esta técnica de gatos planos es posible medir el estado de esfuerzos a compresión en la mampostería mediante la colocación de un gato plano en una ranura practicada en la junta de mortero. Se aplica presión en el fluido hidráulico del gato hasta que se restablezca la distancia original entre dos puntos, uno arriba y otro abajo de la ranura. Si se colocan dos gatos planos en ranuras 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 % (Suprenant y Schuller, 1994).

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 determinar la deformabilidad de la mampostería se usan dos gatos planos paralelos. Las deformaciones a compresión de la mampostería se miden mediante transductores de desplazamiento montados sobre la superficie del muro.

No siempre es conveniente llevar a la resistencia a la mampostería, en particular cuando la importancia estructural o estética del elemento no lo justifica. Cuando así sea, se puede estimar la resistencia extrapolando la curva esfuerzo deformación medida.

Se ha demostrado que este método sobrestima el módulo de rigidez a compresión entre 15 y 20 por ciento, aunque proporciona una medida razonable del comportamiento a compresión de la mampostería.

Para la realización de los ensayos se requiere un taladro o disco para retirar el mortero, dos o más gatos planos, lanas, bomba hidráulica con manómetro y mangueras, transductores de desplazamiento y equipo de seguridad industrial. Para colocar los gatos planos, se requiere practicar una ranura en el mortero. 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.

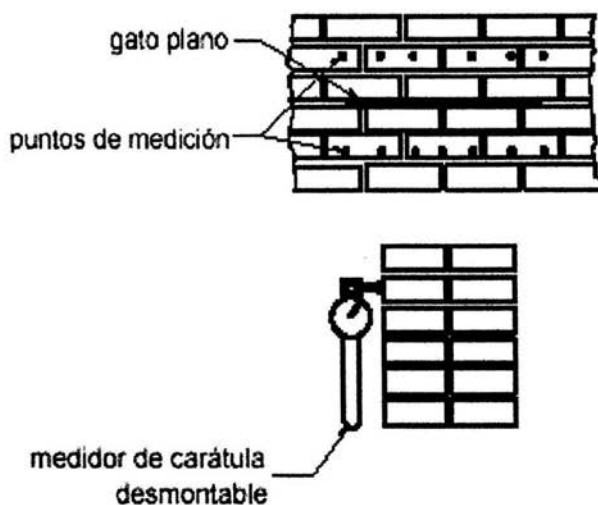


Figura 5.12 Mecanismo de prueba para la determinación in situ del estado de esfuerzos de compresión existente dentro de una mampostería.

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. 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. Estos 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 lanas metálicas de tamaño y forma similares a las del gato. Las lanas 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 lanas.



En la medición de la deformación axial de la mampostería, se usaran transductores con una precisión de 0,005 mm. Esta precisión se puede mejorar si se usan instrumentos electrónicos. El lugar de aplicación de la prueba, usualmente 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 (ver ref 13).

### 5.3.10 Transmisión de pulso.

Dentro de las pruebas de evaluación no destructivas esta la de transmisión de pulso, siendo una de las más frecuentes. El principio en el que se basa esta prueba es medir el tiempo en el que tarda una onda (pulso o tren de ondas) en atravesar la mampostería. La onda es producida por un transductor electro-acústica o por el golpe de un martillo, esta técnica facilita la determinación de uniformidad o de cambios en las propiedades de los materiales, como la extensión y el nivel de deterioro, agrietamiento o huecos en la estructura. Las bajas velocidades son indicativos de materiales de baja calidad, agrietamientos o deterioros.

La velocidad de pulso es una característica de cada material, atendida por la densidad,  $\rho$ , y a su modulo de rigidez dinámica,  $E_d$ . Por tal motivo un material denso y rígido tiene mayores velocidades que uno suave y poroso. Así, la velocidad de transmisión de pulso  $V$  se relaciona con estos parámetros como:

$$v^2 = K \frac{E_d}{\rho}$$

donde

$$K = \frac{1 - \nu}{(1 - \nu)(1 - 2\nu)}$$

Estas relaciones son validas para materiales homogéneos e isótropos de tal forma que no se pueden aplicar estrictamente a muros de mampostería. Por lo que los resultados no son reflejo absoluto de módulo de rigidez absoluta. Para determinar la resistencia de la mampostería, además de que esta prueba se tiene que realizar otros tipos de ensayos destructivos y no destructivos para poder correlacionar los resultados.

La confiabilidad o calidad de estas correlaciones causa discusión, mientras que unos investigadores han encontrado correlaciones aceptables con la resistencia a la compresión y pobres en las resistencias a tensión y corte, otros determinan que es necesaria una gran cantidad de pruebas para establecer predicciones confiables mediante esta prueba.

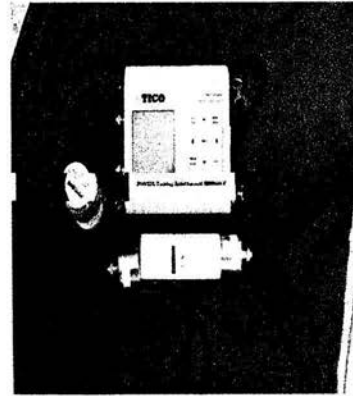
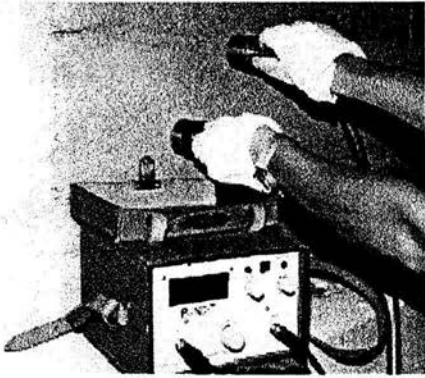
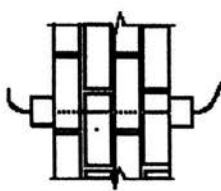


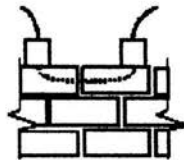
Figura 5.13 Equipo utilizado de transmisión de pulsos ultrasónicos

Los huecos, grietas, agua, tipo de pieza y otros factores afecta la transmisión de pulso. La energía de transmisión se ve atenuada por las superficies que reflejan el pulso, como las superficies de las grietas o huecos.

Un punto fundamental para la determinación de grietas o huecos es la frecuencia dominante del transductor y el pulso de energía transmitida. De tal forma que para pulsos ultrasónicos se usan frecuencias del orden de los 55 KHz, que se utilizan para localizar huecos y grietas relativamente pequeños. Para grandes espesores de mampostería se utilizan pulsos con frecuencia de 1-10 KHz (pulsos sónicos), con mayor contenido de energía y producidos por equipos mecánicos de impacto.



Directo



Indirecto



Eco del pulso

Figura 5.14 Orientación de los trasductores en ensayos de transmisión de pulsos

### 5.3.11 Medición del eco producido

El método de medición de eco producido, es del tipo no destructivo y se basa en la reflexión de ondas de esfuerzo transitorias a través del material para detectar o delimitar las discontinuidades internas de la mampostería. Debido al estado múltiple de reflexión de ondas se crea una condición de resonancia transitoria entre la superficie y las fallas internas. En esta prueba son de gran importancia las ondas primarias P, puesto que son las que producen mayores desplazamientos cercanos al impacto aplicado. Para realizar esta prueba solo se requiere tener acceso a una de las caras de la sección que se va a estudiar.

La onda de esfuerzo se produce por un impacto mecánico sobre el material, una modificación es el uso de un generador de impactos, cuyo contenido de frecuencia se puede optimizar para las condiciones en estudio. La onda medida se analiza en el rango de frecuencia, de modo de obtener el tiempo entre reflexiones sucesivas de la onda. Así conociendo la velocidad de transmisión de pulso del material se podrá determinar la profundidad de la discontinuidad a partir del tiempo de reflexión. Cuando el tiempo de impacto es menor, mayores serán las frecuencias (Y más cortas las longitudes de onda), de modo que el método es más sensible a los defectos pequeños.

Los equipos más comerciales constan de un transductor manual con un preamplificador, y un grupo de esferas de distintos diámetros para aplicar los impactos, una computadora portátil, un sistema de captura de datos y un programa para facilitar la interpretación. Esta prueba a sido empleada para localizar fallas o grietas internas, acero de refuerzo, como para verificar el llenado de las grietas mediante lechadas. Suprenant y Schuller, 1994.

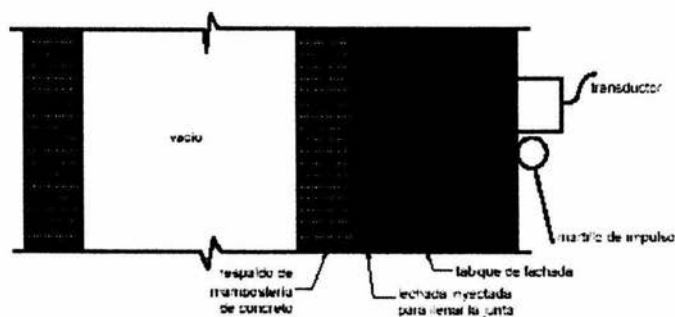


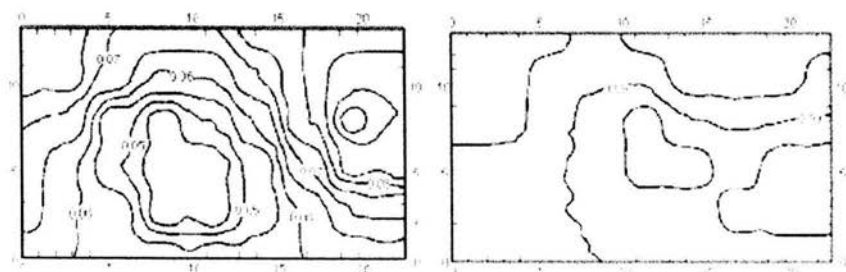
Figura 5.15 Sección transversal se un muro de mampostería de bloque de concreto estudiado mediante la técnica de medición del eco producido por un impacto. En este ejemplo, las pruebas pretenden determinar si la junta entre el bloque de concreto y la fachada fue efectivamente rellenada durante la inyección de la lechada.

### 5.3.12 Tomografía

Se utiliza el principio de combinación matemática de grandes cantidades de proyecciones para formar una imagen de la sección transversal del objeto en estudio. Para realizar esta prueba se pueden utilizar técnicas de rayos X, resonancia magnética o de tipo acústico, de la última hay equipos sencillos para el uso en el campo que usa ondas de alta frecuencia para identificar discontinuidades o huecos.

El principio de esa prueba parte de que el pulso no pasa a través de las grietas o huecos, buscando caminos alternos, produciendo una reducción de velocidad.

El análisis de esta información se procesa mediante un equipo de computo que produce gráficas de isovelocidad. La interpretación de los resultados de esta prueba se dificulta cuando la mampostería está dañada, produciendo reflexiones, refracciones y atenuaciones de ondas de alta frecuencia.



a) pila. Antes de la inyección

b) pila . Después de la inyección

Figura 5.16 Reconstrucción tomográfica de la distribución de velocidades internas en una pila de mampostería:

- Condición original de construcción con huecos interiores;
- Reparada mediante inyección de lechada. Las velocidades se muestran en  $\mu\text{lg}/\mu\text{s}$ .

### 5.3.13 Métodos magnéticos

Permite localizar barras y otros elementos de acero mediante aparatos portátiles de tipo magnético. Alguno de los aparatos más modernos permiten determinar la distancia de la barra a la superficie, como el tamaño de la barra de refuerzo.

Se miden la variaciones en el campo magnético inducido por el aparato, las cuales son proporcionales a la profundidad o cuantía de acero.

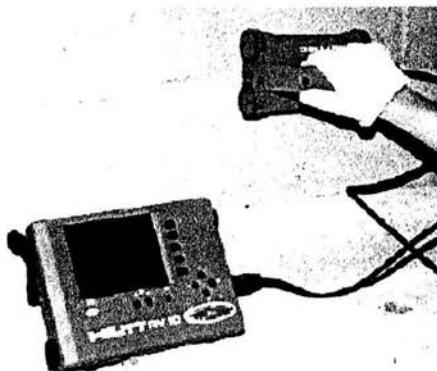


Figura 5.17 Equipo para la localización de barras de refuerzo, así como para determinar Su diámetro y profundidad.

### 5.3.14 Radiografía

Se emplea para esto un emisor de rayos X o gama para determinar la localización de refuerzo, como huecos y defectos. Con el emisor de rayos se ilumina una cara del elemento y una película sensible para registrar.

Estos rayos se ven alterados por la presencia de mortero, piezas, acero, huecos, que atenúan la energía. Una de las limitaciones de este método es el gran tamaño de los equipos, el alto voltaje para su funcionamiento y la radiación. Por tal motivo estos equipos solo pueden ser operados por personas calificadas.

La radiación gama se usa para determinar los perfiles de humedad y sales en la superficie de un material, en el espectro de intensidad de rayos gama se puede observar los picos asociados a elementos químicos presentes.

### 5.3.15 Termografía

En este método se usan frecuencias infrarrojas para identificar patrones de calor, características de ciertos defectos obteniendo de esta forma una representación de alta resolución de calor emitida por el elemento.

Una de las ventajas que tiene este método es que la prueba se puede realizar a distancia y se puede estudiar la estructura de forma 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.

Este método se emplea para localizar grietas en concreto reforzado, así como para identificar huecos en muros de piezas macizas en un muro de mampostería, acero de refuerzo y áreas donde el mortero fluido no penetra en los muros de bloques de concreto relleno.



Figura 5.18 Termografía de rayos infrarrojos de una barra de refuerzo a tensión.

### 5.3.16 Emisión acústica

Se utiliza la medición de emisiones acústicas en materiales esforzados, se localizan las grietas y se detecta su desarrollo, se localizan y se miden las imperfecciones, y se evalúa la integridad de la mampostería.

El método se basa en la disipación de energía de la deformación de un material esforzado cuando se agrieta; esta energía se refleja en ondas de esfuerzo transitorias. Para detectar esta energía se utilizan acelerómetros bastante sensibles, mediante esta técnica poderosa se pueden determinar los niveles de esfuerzo en el umbral de daño, la severidad del daño, agrietamiento por fatiga de bajo ciclaje y para identificar efectos de flujo plástico debido a cargas sostenidas.

### 5.3.17 Pulsos electromagnéticos

Para este método se emplea energía electromagnética en forma de pulsos de frecuencias de 100 Mhz. a 1 Ghz. para identificar los defectos en la mampostería.

Para efectuar este método se requiere tener acceso a ambas caras del muro, por lo que su aplicación se ve un tanto restringida. Suprenant y Schuller 1994, indican que los primeros resultados de este método de evaluación de mampostería son bastante alentadores.

### 5.3.18 Interferometría láser

La interferometría láser holográfica y de bandas se a utilizado para monitorear la fractura y desconchamiento en especímenes ensayados en laboratorio; aun se desconocen las posibles aplicaciones en campo. Este método se basa en proyectar patrones de rayos láser sobre un objeto e identificar las grietas y las deformaciones por las desviaciones y cambios en los patrones de bandas.



### 5.3.19 Petrografía

En este método se realizan observaciones a través del microscopio y en combinación con otras técnicas permite evaluar muestras de mortero y piezas de mampostería. Pudiendo detectar mediante esta técnica el contenido de aire, carbonatación, adherencias, ingredientes, dosificación del mortero, contaminantes, etc.

### 5.3.20 Endoscopia

Es empleada en el caso que es necesario observar el interior de la mampostería. se realiza a través de un orificio de 5 a 10 mm. de diámetro, por lo cual se introduce una fibra óptica dotada de iluminación en la punta. Estas ondas cuentan en los extremos con escalas graduadas para facilitar la identificación y medición de los objetos

Dentro de sus aplicaciones se incluye la determinación del material y la calidad de construcción de muros de gran espesor, e inspección de corrosión en acero, así como la de grietas o huecos internos, que fueran localizados por cualquier otro método. Este equipo por lo general cuenta con cámaras de video o fotográficas para el registro de imágenes.

### 5.3.21 Pruebas de carga

En este método se aplica carga a una estructura o elemento estructural de tal forma de simular estados límites de diseño. Para revisar y medir las características de comportamiento estructural.

### 5.3.22 Potencial de corrosión

En este método se determina mediante 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 colocada sobre la superficie del elemento. Las mediciones se presentan en forma gráfica como las curvas de isotopotencial.

Por lo general voltajes mayores que  $-0.20$  V hay un 90% de probabilidad de ausencia de corrosión, entre  $-0.20$  y  $-0.35$  la corrosión es incierta y para valores menores de  $-0.35$  hay un 90% de probabilidad de presencia de corrosión.

Si se obtienen valores positivos, significa que la humedad en el concreto es baja y los resultados son inválidos por lo que hay que repetir la prueba.



Figura 5.19 Equipo portátil para medir el potencia de corrosión.

## 6. Técnicas de rehabilitación

En este capítulo se expondrán diferentes técnicas de rehabilitación para muros de mampostería. El reemplazo de piezas y de concreto dañados; la reparación de grietas; la inserción de barras de refuerzo; el encamisado de muros; y la adición de elementos de concreto reforzado son principales modalidades de rehabilitación. Algunas de las recomendaciones aquí presentadas se basan en estudios experimentales .

En la siguiente figura se muestra, de manera cualitativa, la relación entre el desempeño que ha presentado 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.

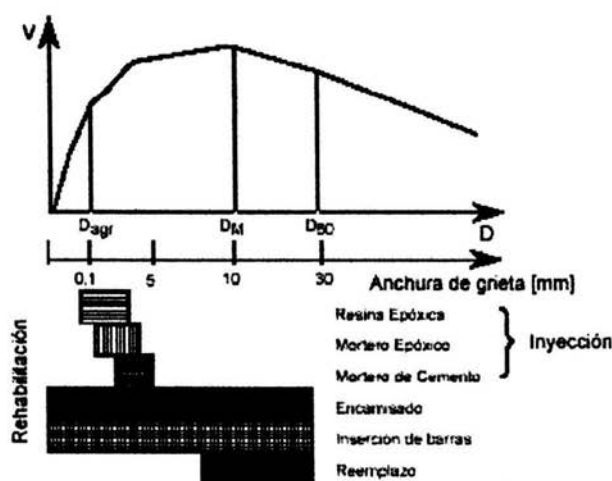


Figura 6.1 Desempeño de un muro de mampostería existente, nivel de daño esperado y posibles esquemas de rehabilitación

## 6.1 Reemplazo de piezas y de concreto

El remplazo de piezas generalmente se utiliza en zonas muy dañadas, en donde la calidad de la ejecución juega un papel de suma importancia en la rehabilitación para poder lograr un óptimo desempeño. Generalmente se aplica en combinación con otras técnicas de rehabilitación de este capítulo.

Para la realización correcta del remplazo es muy común utilizar el apuntalamiento y renivelación de la estructura, así como el uso de morteros o de concreto con aditivos estabilizadores de volumen, con lo cual se pretende disminuir la contracción causada por el fraguado y las fisuras que se presentan por las restricciones a la contracción,

Es de suma importancia en esta técnica de remplazo de piezas y de concreto dañados el uso de materiales del mismo tipo y que la resistencia sea al menos igual al material original. Frecuentemente se aprovecha la reparación para mejorar las características de la estructura, con materiales de características superiores a los originales. Se recomienda tener especial cuidado con este remplazo de piezas y concreto con propiedades muy diferentes, esto puede desencadenar concentraciones de esfuerzos que pueden dañar la estructura, en este caso la rehabilitación resulta peor, que el daño que existía en la estructura. Un ejemplo de esto es cuando se presentan cambios volumétricos diferentes a la mampostería original. Las distintas deformaciones en los materiales ( el existente y el nuevo) generan deformaciones y esfuerzos locales que generan agrietamiento y daño posterior a la estructura.

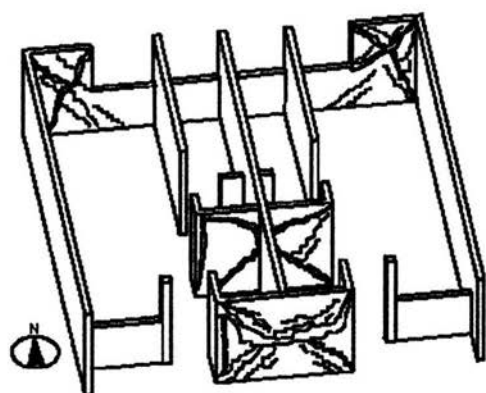
Esta técnica como se dijo al principio se utiliza en zonas muy dañadas, como muros dañados por sismo, en el cual se caracteriza por el aplastamiento de las piezas a lo largo de las grietas inclinadas, así como por el aplastamiento y desconchamiento del concreto de los elementos confinantes.

Hay que recordar que los castillos no solo contribuyen a incrementar la capacidad de desplazamiento lateral de la estructura y dar estabilidad a su comportamiento, también contribuyen en la capacidad de carga vertical de modo determinante.



Figura 6.2 Daño severo en una vivienda después de sismo en Cd. Serdán Pue. Se puede observar daño en los muros interiores de la vivienda.

A)



B)

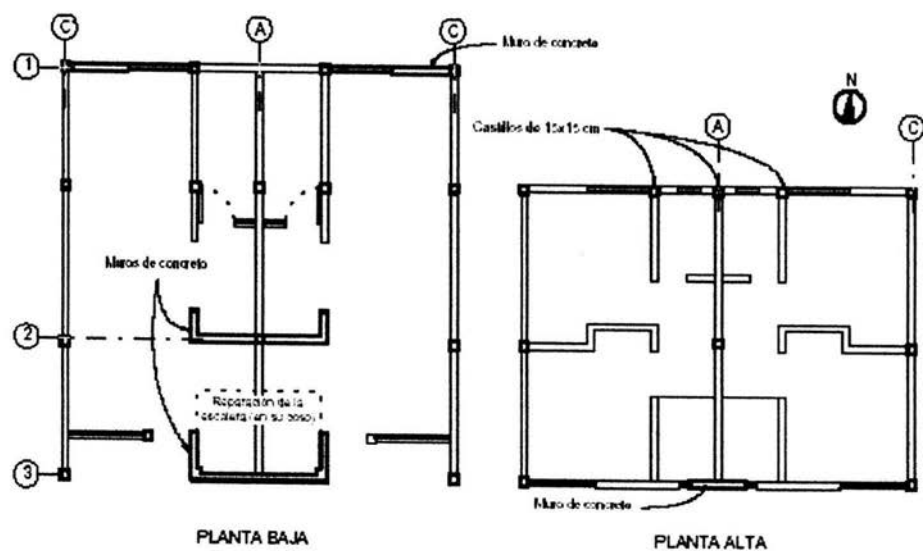


Figura 6.3 A) Disposición del daño en la planta baja de la vivienda. B) Esquema de rehabilitación reemplazando muros de mampostería dañados y adicionando muros de concreto y castillos (ver ref.6).

## 6.2 Reparación de grietas.

La grieta es la manifestación de daño en un muro de mampostería. Para reparación de las grietas la forma más sencilla es cerrarlas o rellenarlas con materiales similares o diferentes a la mampostería existente. En esta técnica de rehabilitación existen dos alternativas sencillas para eliminar las grietas en la mampostería:

- a) La inyección
- b) El rajueo

Para la realización de esta técnica es necesario retirar el aplanado aproximadamente 30 cm. a ambos lados de la grieta en ambas caras del muro.

En la primera alternativa, las grietas son rellenadas mediante la inyección de resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento. La inyección de morteros generalmente se utiliza para rehabilitar muros con un número pequeño de grietas y que además se encuentren bien definidas. Generalmente esto se presenta en muros sin refuerzo horizontal o con baja cuantía de refuerzo horizontal y vertical.

El agrietamiento en muros con cuantías de refuerzo iguales o superiores a las mínimas requeridas de acuerdo al reglamento del D.D.F. presentan una distribución uniforme de grietas o fisuras de un ancho muy pequeño. En este caso la inyección de grietas sería muy difícil y con un alto costo.

### 6.2.1 Aplicación de resinas

La viscosidad de las resinas juega un papel importante para lograr un llenado completo en las grietas, así mientras mas grande sea la anchura de la grieta mayor será la viscosidad. Las resinas tienen altas resistencias a la tensión, aproximadamente 300 a 500 kg/cm<sup>2</sup> y a la adherencia con las piezas, de tal forma que las nuevas grietas que se formen sean paralelas a las reparadas o existentes.

La anchura mínima para rellenar las grietas a presión es de 0.05 mm. y por gravedad de 0.3 mm. Cuando las piezas tienen un alto grado de absorción es conveniente usar resinas espumantes con aditivos estabilizadores de volumen.

La inyección de resinas en muros de mampostería es muy similar a la que se realiza en estructuras de concreto reforzado. En muros de mampostería, no se recomienda la inyección por vacío por la variabilidad que se obtiene en la penetración y llenado de la grieta. Esta técnica consiste en iniciar con la limpieza de las grietas, retirando todo el material suelto o flojo y residuos de polvo, sin el uso de agua para la limpieza, a menos que se garantice el secado de esta antes de la aplicación del material epóxico. Las resinas epóxicas no se adhieren en el material húmedo. Por tal motivo es conveniente el uso de aspiradoras industriales para la limpieza de las grietas. A continuación son selladas las grietas en ambas caras del muro mediante una pasta de viniléster o poliéster y se colocan las boquillas para la inyección.

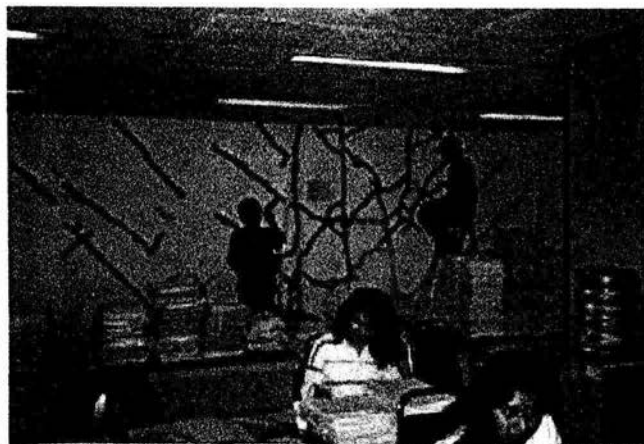


Figura 6.4 Preparación de un muro para la inyección de resinas epóxicas.

Es recomendable que la separación entre las boquillas a lo largo de la grieta, sea de una vez el espesor del muro. La inyección a presión se realiza a través de bombas especiales inyectando la resina de abajo hacia arriba. Se puede decir que la inyección de la resina es satisfactoria, cuando la esta sale por la boquilla inmediata superior. Se procede a cerrar la boquilla y se sigue con la siguiente boquilla superior. Una vez que se han sellado las grietas del muro se puede retirar las boquillas y el sello con una espátula, aplicando un poco de calor.

Con esta técnica si se ejecuta adecuadamente se restituye entre el 70 y 90% de la resistencia, de el 30 al 80% de la rigidez y del 75 al 90% de la capacidad de deformación del muro original.

#### 6.2.2 Aplicación de morteros de cemento.

Entre las características más importantes de las lechadas o morteros fluidos de cemento son: ser inyectables, estables, resistentes y contar con partículas pequeñas. La primera es la facilidad que tiene el mortero para fluir a través de la grieta y vacíos, la segunda la baja segregación, sangrado controlado y una reducida contracción plástica. Además de la resistencia a la compresión, tensión y adherencia con las piezas de la mampostería. Las lechadas de mortero bien diseñadas pueden utilizarse para reparar grietas con anchos de 0.08 mm. a 12 mm. o más.

Para la aplicación de los morteros de cemento se barrena el muro a lo largo de la grieta para la colocación de las boquillas de inyección a una distancia entre los 70 y 300 mm. La separación dependerá de la anchura y rugosidad de la grieta. Generalmente para grietas con anchura menor de 1 mm. se recomienda colocar las boquillas cada 70 mm.

Los barrenos deben tener diámetros entre 6 y 12 mm. y una profundidad de 50 mm. Si las grietas son más anchas se pueden utilizar boquillas de superficie, estas constan de una base metálica, que se adhiere al muro y un tubo perpendicular ( boquilla que se conecta a la manguera ).

Para los agrietamientos que siguen las juntas de la mampostería es recomendable realizar los barrenos en las juntas a la mitad de las juntas verticales. Posteriormente se limpia la grieta y los barrenos, retirando el polvo y el material suelto con una aspiradora de tipo industrial. Posteriormente se sellan las grietas con un material de fraguado rápido capaz de resistir la presión de la inyección del mortero. Generalmente se utiliza viniléster o poliéster.



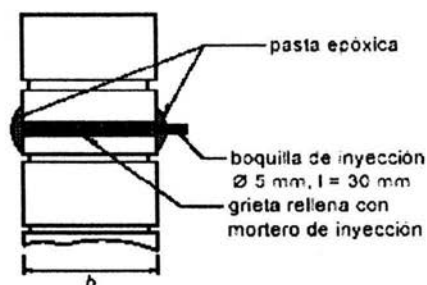
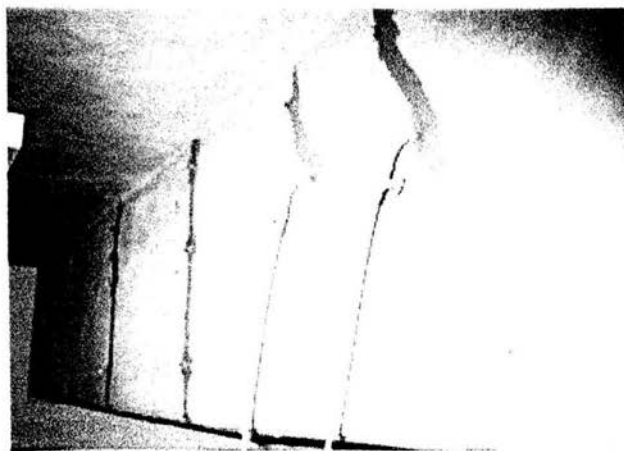


Figura 6.5 Reparación de grietas en muros mediante la inyección de morteros de cemento.

El viniléster tiene la desventaja de ser ligeramente soluble al agua, de tal forma que puede complicarse el proceso de inyección.

Se procede a retirar las partículas de la grieta inyectando agua a presión (  $1 \text{ kg/cm}^2$  ), iniciando por la boquilla que se encuentra en la parte más alta, hasta que el agua que salga de todas las boquillas, este libre de partículas. De esta forma se logra saturar el muro y por lo tanto se evita un fraguado prematuro de la lechada. La limpieza de la grieta con agua es conveniente realizarla 24 horas antes de la aplicación del mortero; 30 minutos antes es conveniente aplicar un ligero flujo de agua.

Para inyectar el mortero se aplica una presión de  $0.5$  a  $1 \text{ kg/cm}^2$ , es recomendable no utilizar altas presiones, puesto que las burbujas de aire producidas quedan atrapadas dentro de la lechada, provocando una rápida separación o filtrado de los sólidos al penetrar en la grieta. Este problema se resuelve utilizando una presión lo más baja posible.

La inyección debe de realizarse de abajo hacia arriba, una vez que sale la lechada en la boquilla siguiente ( inmediata superior ), se recomienda mantener la presión por 30 seg. más para garantizar la compactación de la lechada y evitar problemas de estabilidad. La inyección se realiza con un recipiente a presión que tiene un regulador y un manómetro para verificar y mantener la presión.

El mezclado de la lechada es un aspecto importante que se debe de cuidar, de modo de garantizar una mezcla homogénea se recomienda aplicar 3500 rpm. durante un tiempo de 3 minutos como mínimo para deshacer los componentes en partículas más pequeñas.

Para lograr un adecuado curado es recomendable retirar el sellado de las grietas 24 horas después de la inyección del mortero. El retiro de los sellos se puede realizar con un cepillo de alambre en el caso del viniléster, con un espátula y aplicando calor en el caso de las pastas de resina epóxica.

La estabilidad de las lechadas se puede mejorar con el uso de aditivos superfluidizantes o de humo de sílice. Atkinson y Schuller recomendaron mantener la relación agua/cementante entre 0.75 y 1.0 para cemento Portland tipo I , el uso de aditivos superfluidizantes y estabilizadores de volumen, así como humo de sílice, para mejorar la estabilidad e incrementar la resistencia a la tensión y adherencia. Sugieren dosificar el superfluidizante al 2% del peso de los cementantes. El uso de cemento tipo III y humo de sílice da como resultado, resistencias superiores a tensión y adherencia, así como lechadas más estables.

Se ha observado que el humo de sílice mejora de manera significativa la retención de agua y reduce el endurecimiento prematuro de la lechada mientras que fluye por las aberturas pequeñas. De tal forma se ha observado que la cal, la ceniza y el mortero de albañilería no mejoran las características de la lechada, por lo que se debe descartar su uso. Generalmente los muros que se han reparado mediante esta técnica de inyección de mortero de cemento han recuperado e incluso mejorado, su resistencia ( 80 a 120 % ), rigidez ( 50 a 100% ) y la capacidad de deformación ( 80 a 90% ) con respecto a sus propiedades originales.

### 6.2.3 Reparación de grietas con rajuelas

En las grietas que presentan anchuras superiores a los 5 mm. es muy común repararlas con rajuelas. Las rajuelas son pedazos de tabique o piezas que se insertan, en cajas que se abren previamente en la grieta, para este proposito.

Las rajuelas deben de acuíñarse debidamente y pegarse con mortero tipo I según el reglamento de construcciones del D.D.F.

Antes de la colocación del mortero se procederá a realizar la limpieza de la grieta con agua para que las superficies estén libres de piezas sueltas y de partículas. Es recomendable el uso de aditivos estabilizadores de volumen. Controlando de esta forma los cambios volumétricos y la contracción por fraguado que se pueda presentar.

### 6.3 Colocación de barras de refuerzo

La colocación de barras de refuerzo a lo largo de las juntas de mortero, es una opción para la rehabilitación de los muros de mampostería. Para la colocación de las barras se requiere, el ranurado a lo largo de la junta horizontal a ambos lados del muro y realizar barrenos trasversales a cierta distancia para amarrar las barras entre si. Una vez colocadas las barras, en ambos lados del muro se procede a recubrir con mortero de cemento o de tipo epóxico.

Las barras que son colocadas en las ranuras horizontales deben ser ancladas perfectamente en los extremos del muro de mampostería con ganchos a  $90^\circ$  ó en los elementos confinantes del muro si es que existen. Con esta técnica se han logrado alcanzar recuperaciones aceptables de resistencia, rigidez y capacidad de deformación. El principal inconveniente de esta técnica es el proceso laborioso como la perfecta supervisión que debe de existir para obtener un buen desempeño en la rehabilitación.

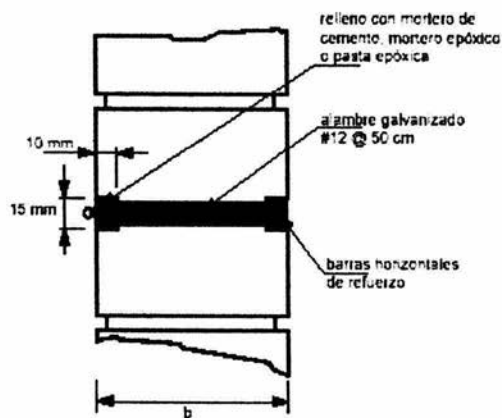
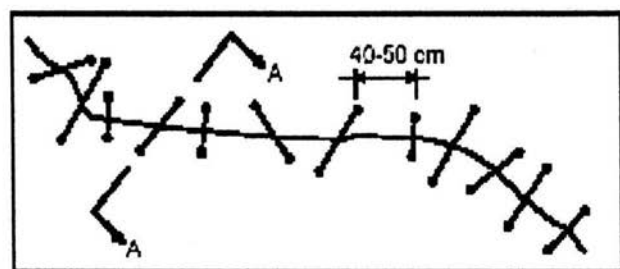


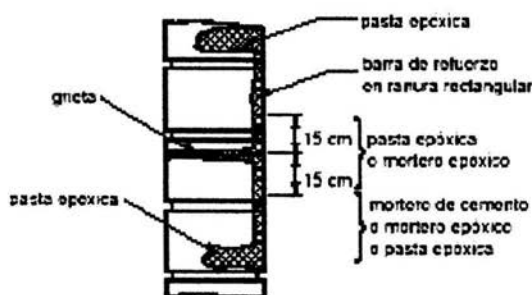
Figura 6.5 Colocación de barras de refuerzo horizontales para rehabilitar mamposterías.

Otra de las alternativas de la reparación con barras es la de engrapar las grietas o fisuras del muro. Esta técnica puede ser práctica si el número de grietas es pequeño. Para su realización se colocan barras de refuerzo con ganchos a  $90^\circ$  en sus extremos (como una grapa de papel), en barrenos y ranuras que se realizan en el muro previamente. Las barras son colocadas de forma perpendicular a las grietas para resistir las tensiones que se producen cuando la grieta tiende a abrirse nuevamente. Posteriormente se rellenan los barrenos y ranuras con mortero de cemento o resinas epóxicas.

Los resultados que se han obtenido en el laboratorio arrojan un pobre comportamiento de los muros, reparados mediante esta técnica ante los sismos, debido al pandeo de las grapas inclinadas, cuando el sentido de aplicación se invierte y las grapas tienden a trabajar a compresión. Cabe aclarar que el desempeño de esta técnica ante situaciones monótonas ha sido satisfactorio y que generalmente se emplea para restaurar monumentos históricos.



Elevación



Corte A-A

Figura 6.6 Colocación de grapas sobre grietas en muro de mampostería.

## 6.4 Encamisado de muros

Otra forma de rehabilitar los muros de mampostería es mediante la fijación de mallas metálicas y recubiertas con mortero de cemento colocado a mano o bien lanzado. Los muros se pueden encamisar además con materiales sintéticos producto de la tecnología aeroespacial.

### 6.4.1 Encamisado con mallas metálicas

El encamisado con mallas metálicas es la técnica más confiable y económica para la rehabilitación de muros de mampostería. Para tal efecto se utilizan mallas metálicas electrosoldadas o hechas a base de barras convencionales, perfectamente adosadas a los muros por medio de anclas o clavos y recubiertas con mortero de cemento- arena o concreto lanzado de 3 cm. de espesor al menos. Mediante la utilización de esta técnica se pueden obtener incrementos en la resistencia, rigidez y capacidad de deformación originales superiores al 20,50 y 100% respectivamente. Otra de las características que ofrece esta técnica es el aumento de la resistencia a la 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 primera vez que se utilizó esta técnica fue en 1976 después del sismo Friuli Italia desde esa fecha se ha utilizado en distintos lugares del mundo.



Figura 6.7 Encamisado de una estructura de mampostería con malla metálica después del sismo de Friuli Italia en 1976

En el año de 1995 Tomas Ruiz demostró en un estudio realizado que el comportamiento de muros con daño muy severo ( agrietamientos de 2 cm. de anchura y aplastamiento de concreto en los extremos de los castillos ), reparado con mallas electrosoldadas y recubiertos con mortero fue incluso mejor que la original en términos de resistencia y capacidad de deformación. La rigidez de la estructura rehabilitada fue mayor del 66% de la original.

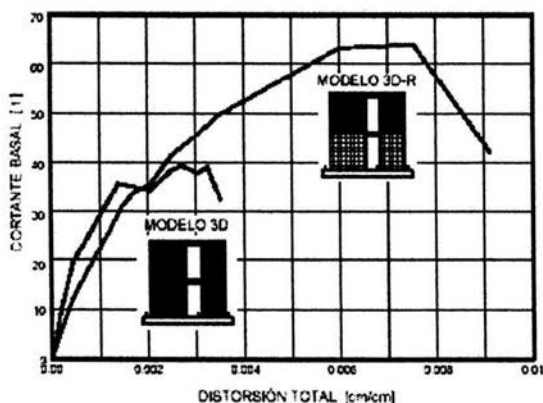


Figura 6.8 Envolturas de respuesta de una estructura de mampostería original y una reparada con malla metálica recubierta con mortero (Ruiz 1995).

Para fines de diseño se propuso que la resistencia del muro rehabilitado se calculara como la suma de la contribución de la mampostería (resistencia remanente de la mampostería) y la participación de la malla electrosoldada.

Para la primera, la resistencia remanente de la mampostería en esta estructura fue igual al 80 por ciento de la carga de agrietamiento.

Para la segunda, se propuso que el esfuerzo resistente de la malla se calculara multiplicando la cuantía de refuerzo horizontal de la malla por el esfuerzo nominal de fluencia, afectando el producto por un factor de eficiencia igual a 0,5. Este factor considera la distribución no uniforme de deformaciones y esfuerzos de la malla en la altura del muro. Este valor es menor al propuesto para muros sin daño que se discute más adelante.

La eficiencia de rehabilitar muros de mampostería confinada sin daño con mallas electrosoldadas recubiertas con mortero de cemento ha sido evaluada experimentalmente con resultados extraordinariamente alentadores. Las recomendaciones desarrolladas a partir de los resultados, experimentales son también aplicables a muros con daño rehabilitados con encamisados con mallas metálicas.

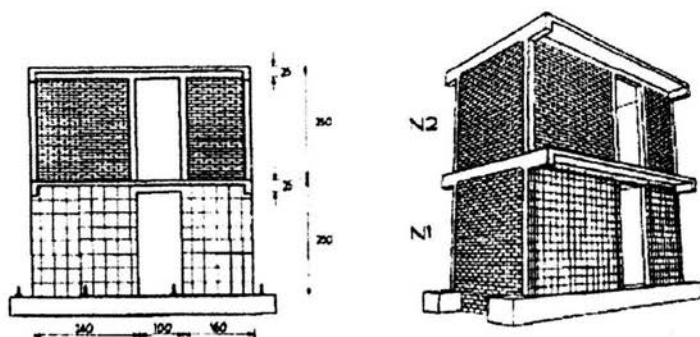


Figura 6.9 Modelo utilizado pro Ruiz en 1995 para estudiar la rehabilitación en muros mediante el encamisado con mallas metálicas.

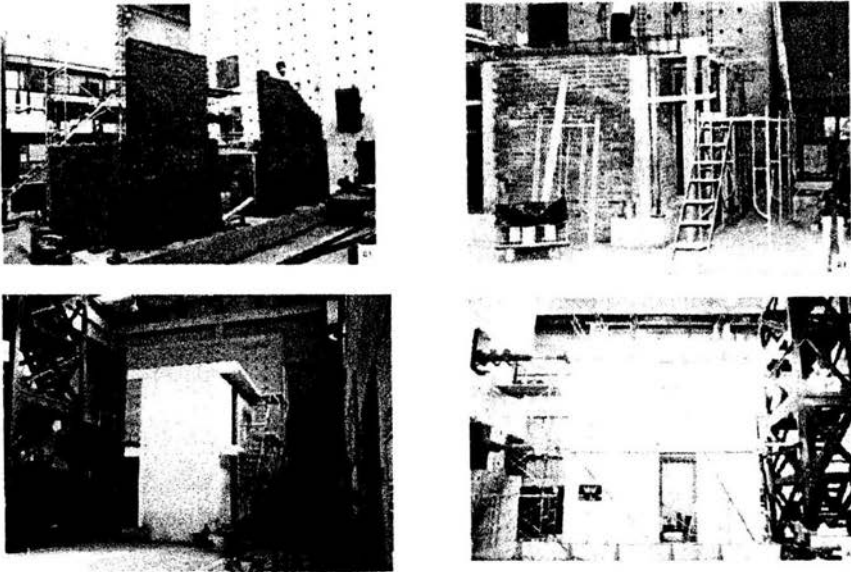


Figura 6.10 Proceso de construcción del modelo de Tomas Ruiz en el CENAPRED.

Para obtener un comportamiento monolítico del encamisado se recomienda retirar todo el recubrimiento del muro ( aplanados ), así como el retiro de las piezas sueltas en los muros dañados severamente. Una limpieza con chorro de agua para retirar el polvo y las partículas, la reparación de las grietas con resinas epóxicas, inyección de mortero o la reparación con rajuelas antes del encamisado. La malla se fija directamente sobre las caras del muro, o mediante el uso de separadores. Sin embargo en las pruebas de laboratorio se ha observado una mala función de estos, puesto que disminuye la resistencia al corte y aumenta la flexibilidad del fijador facilitando su propia extracción. Generalmente en muros de piezas macizas se recomienda colocar mallas calibre 8 o 10, que se pueden fijar con clavos de 64 mm. de largo, colocando no menos de 9 piezas por  $m^2$ . Para muros con piezas de mala calidad se recomienda fijar la malla con 16 clavos por  $m^2$ . Cuando se utilizan malas de mayor calibre ( como calibre 4 o alambón de 6.4 mm. ) es recomendable fijarlos con ayuda de una pistola Hilti o similar con cargas de pólvora que dispara fijadores de acero.



Figura 6.11 Anclaje de malla metálica a muro de mampostería con clavos.

Estos fijadores pueden ser del tipo X-ZF con arandela, también se pueden utilizar para fijar las mallas delgadas.

En cuanto a la forma de fijar la malla también se ha sugerido el uso de sujetadores que traspasen el muro. Implicando la perforación del muro en distintos lugares para la colocación del fijador, el relleno de las perforaciones con resinas epóxicas y el excesivo costo de esta solución.



Figura 6.12 Anclaje de malla metálica de un muro de mampostería con conectores Hilti.

En muros fabricados con piezas huecas como los bloques de concreto se emplean alcañatas de acero de bajo carbono (A-36) o de varilla corrugada para sujetar las mallas metálicas. El CENAPRED ha realizado varios estudios para evaluar el comportamiento de los fijadores ( Informe TELMEX ), obteniendo como resultado que se puede obtener un comportamiento aceptable si las alcañatas son fijadas en las juntas del mortero y tienen una longitud igual al ancho del muro.

Las mallas se deben de colocar también alrededor de los castillos. Esto se puede lograr traslapando la malla en forma de U para rodear el castillo, con las mallas colocadas sobre ambas caras del muro. Se recomienda que exista continuidad de la malla en muros ortogonales, así como incrementar el número de fijadores en los cambios de dirección. De la misma forma es indispensable que en las aberturas de los muros, las mallas deben rodearlas por completo. La colocación del mortero puede ser de forma manual o bien con dispositivos neumáticos ( lanzado ), en la práctica se ha observado que con una buena ejecución, los muros con recubrimiento de concreto lanzado alcanzan una mayor resistencia y rigidez que aquellos en que se ha colocado el mortero manualmente.

En las mamposterías confinadas las mallas deben de ser perfectamente ancladas a los castillos y dadas, así como recubrir estos elementos con el mortero o el concreto del encamisado.

El mortero para recubrir las mallas será lo más resistente posible ( mortero tipo I , según el D.D.F. 1987 ), cuidando la calidad de la arena en cuanto a su graduación. Ya que, si esta es demasiado fina produce agrietamiento por contracción, facilitando la entrada de agua y cloruros que favorecen la corrosión en la malla.



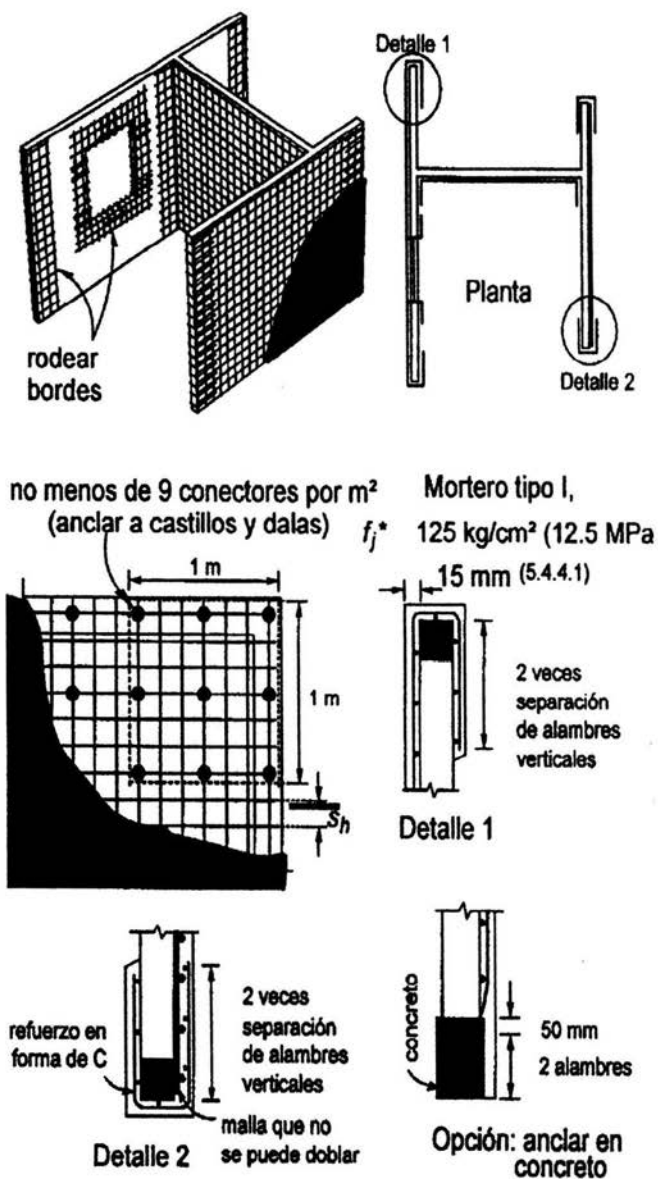


Figura 6.13 Detalles de la colocación de encamisado con malla metálica.

En caso de ser necesario el reforzamiento de los cimientos del muro se puede extender el encamisado hasta estos. Para lo cual se necesita abrir cepas y limpiar perfectamente las caras de los cimientos y quitando algunas piedras, para formar un amarre entre la cimentación y el mortero de recubrimiento.

El rehabilitación de los muros con mallas metálicas ofrece una gran ventaja sobre la inserción de barras horizontales en cuanto al costo, la facilidad de los trabajos y la supervisión de estos (ver ref. 21).

#### 6.4.2 Encamisado con materiales plásticos.

Recientemente se ha dado el uso de encamisado ( total o parcial ) de mampostería con materiales plásticos. Los muros o estructuras son reforzadas usando la capacidad de carga a tensión de estos materiales plásticos, de forma similar al papel que juega el acero en el concreto reforzado. Esta propiedad de los materiales plásticos se puede utilizar para reforzar a flexión, cortante o compresión; dependiendo de la orientación que se le de a estos materiales. Dentro de los materiales que se utilizan para el encamisado se encuentran las fibras y las resinas.

##### a) Fibras

Las fibras que se utilizan son largas y continuas, pueden ser de vidrio, carbono o aramid. Estos materiales se pueden encontrar en forma de cables , bandas unidireccionales o telas. La presentación comercial que se les da a estos materiales influye directamente en la cantidad de resina que se utiliza para su aplicación así como la forma en que esta humedece a las fibras. También se tiene repercusión en la facilidad para aplicarla y para adaptarse al contorno del elemento. Las fibras exhiben un comportamiento elástico-lineal hasta su falla, en comparación con la poca resistencia transversal.

Parámetro	Fibra de vidrio	Aramid	Carbón de alta resistencia	Acero grado 42
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2 540	1 450	1 800	7 850
Resistencia a la tensión (MPa)	3 450	3 620	3 800	620
Rigidez a tensión (GPa)	72.4	131	227	200
Deformación a la falla (%)	4,8	2,8	1,7	12

Tabla 6.1 Comparación de las propiedades de las fibras plásticas y el acero de refuerzo

Parámetro	Fibra de vidrio	Aramid	Carbón de alta resistencia
Resistencia a tensión	Moderada	Alta	Alta
Rigidez a tensión	Baja	Baja	Moderada
Deformación a la falla	Moderada	Moderada	Baja
Resistencia a la fatiga	Baja	Moderada	Alta
Resistencia a flujo	Moderada	Moderada	Alta
Nivel de esfuerzo a la falla	Bajo	Moderado	Alto
Resistencia al impacto	Alta	Alta	Moderada
Estabilidad frente al calor	Alta	Moderada	Alta
Resistencia a alcalis	Baja	Moderada	Alta
Costo	Bajo	Alto	Alto

Tabla 6.2 Comparación cualitativa entre fibras plásticas para la rehabilitación de estructuras

En las fibras de vidrio podemos encontrar tres tipos la E, S y AR, la de tipo E es la más utilizada, la S tiene mayor resistencia a la tensión y la AR mayor resistencia a los álcalis. Las fibras de Aramid mejor conocidas comercialmente como Kevlar. Se caracteriza por poseer alta resistencia, bajo peso y una excelente resistencia al impacto. Sin embargo es la fibra menos utilizada.

Las propiedades mecánicas y resistencia al medio ambiente que poseen las fibras de carbono la hacen el material ideal para la rehabilitación estructural. La rigidez a tensión de las fibras de carbono de alta resistencia es mayor, que las de fibras de vidrio.

Entre las principales ventajas que presentan las fibras están: la durabilidad, las relaciones de resistencia/peso y rigidez/peso, en comparación con las placas de acero. En la sig. figura se compara la resistencia a la fatiga de las fibras plásticas con la del acero.



Figura 6.14 Comparación entre resistencias a la fatiga de fibras de carbón ( grafito ), acero, fibra de vidrio y aluminio.

## b) Resinas

La función de las resinas es distribuir la carga de las fibras, además de mantener a las fibras alineadas y protegerlas del medio ambiente. Las resinas más utilizadas son: poliéster isoftálico, viniléster y epóxica.

Las resinas de poliéster son de bajo costo, pero tienen altas contracciones sin embargo, esta desventaja se pueden eliminar si se aplica en encamisados prefabricados. Las resinas de viniléster están relacionadas con las resinas de poliéster y epóxicas for su formulación química por lo que presenta características de ambas. Las resinas epóxicas poseen propiedades mecánicas bien conocidas y una excelente adhesión a varias fibras, así como a materiales base y de relleno.

Para realizar la aplicación de estos materiales debe de haber una compatibilidad entre ellos. Las resinas de viniléster se usan para colocar las fibras de vidrio, mientras que las epóxicas se utilizan para colocar las tres clases de fibras.

Parámetro	Poliéster (Curado en planta)	Viniléster (Curado en planta)	Epóxica (Curado en horno)	Epóxica (Curado a T ambiente)
Resistencia a tensión	Baja a moderada	Moderada	Moderada a alta	Moderada a alta
Rigidez a tensión	Baja a moderada	Moderada/alta	Moderada a alta	Moderada
Deformación a la falla	Baja	Baja/moderada	Moderada a alta	Moderada a alta
Flexibilidad	Baja	Baja	Moderada	Moderada
Resistencia a flujo plástico	Alta	Alta	Moderada	Moderada
Resiliencia	Baja	Baja/moderada	Moderada	Moderada
Resistencia al impacto	Baja	Baja/moderada	Moderada	Moderada
Estabilidad al calor	Baja a moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Resistencia la humedad	Moderada	Moderada	Moderada a alta	Moderada a alta
Resistencia a álcalis	Baja a moderada	Moderada	Alta	Alta
Resistencia a radiación UV	Baja	Baja	Baja	Baja
Costo del material	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado

Tabla 6.3 Comparación cualitativa de las resinas utilizadas para el encamisado con fibras plásticas.

Las fibras plásticas no sufren ningún deterioro por la exposición a los rayos ultravioleta (UV), en comparación con la resina epóxica que se decolora por la exposición a los rayos ultravioleta. Por lo que se recomienda protegerla aplicando una capa de recubrimiento que limite la radiación (UV).

## Métodos de aplicación

Son cinco los principales métodos de aplicación de fibras plásticas para rehabilitación estructural.

a) Placas rígidas. Su aplicación es similar a la de las placas metálicas. De una hoja de material compuesto, ya curado, se corta una placa con la longitud y anchura necesarias, y se adhiere a la superficie ya preparada del elemento por ser reforzado.

b) Camisas prefabricadas. Son tubos circulares u ovals, de gran diámetro y espesor pequeño, que se fabrican y curan en taller. Las camisas, que poseen un corte longitudinal, se colocan envolviendo al elemento y se cierran con adhesivos, zunchándolas mientras curan.

c) Cables enrollados. Se enrollan cables de fibra en elementos tipo columna. Los cables pueden ser impregnados de resina en el campo o bien pueden llegar de la fábrica ya impregnados (tipo prepeg).

d) Bandas pultruidas. El término pultrusión se refiere al proceso de estirado de fibras continuas a través de un dado simultáneamente a la impregnación de resina sin curar, de modo de formar una banda angosta de sección transversal constante. Este proceso se lleva a cabo en fábricas, de modo que, la banda ya curada, es adherida a las superficies del elemento ya preparadas.

e) Colocación en húmedo. En este método, una tela u hoja se satura con resina en el sitio y se coloca sobre el elemento formando una lámina de material compuesto. La saturación se puede lograr con técnicas manuales o mecánicas.

La colocación de fibras de materiales sintéticos (compuestos) para rehabilitar estructuras de mampostería, permiten:

a) incrementar el confinamiento de muros, lo que se traduce en resistencias superiores y una mayor capacidad de deformación

b) Aumentar la resistencia a flexión fuera del plano.

c) Mejorar la resistencia a corte en el plano.

d) Aumentar la masa del edificio y el espesor de muros en cantidades despreciables

e) No modificar la cimentación.

f) Rapidez en la construcción, ya que las fibras se cortan en obra y no se requiere desalojar el edificio.

g) Facilidad en la construcción.

En algunos casos es necesario colocar pernos de anclaje, tal y como sucede para fijar los extremos de las fibras en vigas de concreto cuando éstas se colocan en sentido perpendicular al eje longitudinal para mejorar el confinamiento y resistencia a tensión diagonal. Este caso ejemplifica una alta concentración de esfuerzo que obliga a sujetar a la fibra con placas y pernos.

Los resultados experimentales indican que el encamisado con materiales sintéticos es altamente efectivo para incrementar la resistencia a cargas laterales, reducir las deformaciones por corte y para mejorar la ductilidad de la edificación completa.

Se ha sugerido que las bandas unidireccionales son preferibles sobre las telas bidireccionales que cubren toda la superficie del muro. Si se usan bandas, deben orientarse de modo que crucen perpendicularmente a las grietas inclinadas Schwegler y Kelterborn (1996), han presentado la aplicación de modelos de puntales y tensores para optimar el diseño e instalación. Si se emplean fibras en forma de telas, se recomienda orientar las fibras horizontalmente para cruzar las grietas diagonales o de corte, de modo de permitir que las grietas a flexión se abran.

Las fuerzas que se pueden transmitir a las camisas sintéticas están limitadas por la resistencia al corte rasante o la resistencia a tensión de la mampostería, ya que por lo general, las resinas poliméricas exhiben resistencias superiores que el material base (concreto o mampostería).



Figura 6.15 Rehabilitación de un muro de mampostería usando bandas de carbono.

Es recomendable confinar los talones de un muro, si es posible, de modo de controlar el aplastamiento por compresión y una falla por estabilidad lateral del talón de compresión. El incremento de la resistencia a flexión en el plano depende de un anclaje adecuado de la fibra; si se usan pequeñas longitudes de desarrollo y/o no se colocan anclajes en los extremos de las fibras y/o la resistencia a tensión del material base es baja, se puede producir fallas prematuras caracterizadas por desprendimiento de las láminas debajo de la resina.

Actualmente el costo para realizar rehabilitaciones con materiales sintéticos es bastante alto. Por lo que regularmente se emplea esta técnica solo en algunos edificios de gran valor histórico o estético (ver ref. 13).

#### 6.5 Adición de dalas y castillos.

En algunas estructuras es necesario la construcción de dalas y castillos para mejorar todo el comportamiento de estas y no solamente de ciertos muros. Como sucedió después del sismo de 1985 muchas de las construcciones fueron construidas atendiendo reglamentos anteriores o sin ninguno. De tal forma quedo al descubierto la necesidad de construir dalas y castillos en la estructura. Tal vez porque no existían o por que sus dimensiones, o ubicación eran inadecuados. En el diseño y construcción debe satisfacer los reglamentos vigentes.

## **Conclusiones.**

La necesidad del hombre por protegerse de las inclemencias del tiempo dio surgimiento a la mampostería. Evolucionando a la par del hombre y creciendo muy rápidamente después de la revolución industrial, hasta nuestros días en que podemos encontrar distintos tipos de mampostería reforzada.

Los materiales más importantes en la construcción de muros de mampostería actualmente son el tabique (Pieza), el mortero, además del acero de refuerzo y del concreto con los se forman varios tipos o sistemas de muros:

Muro diafragma el cual esta rodeado de elementos estructurales de concreto o de acero.

Muro confinado aquellos que son reforzados por medio de dadas y castillos.

Muro reforzado interiormente son aquellos que están construidos por piezas huecas en donde se aloja el acero de refuerzo vertical, el horizontal se aloja en las juntas.

Los sistemas de piso y las cimentaciones tienen gran importancia para construcción de estructuras de mampostería puesto que en estos elementos son donde se apoyarán estas. Y tienen que cumplir con ciertas características para un buen funcionamiento en conjunto.

Para el análisis de comportamiento de las mamposterías reforzadas, es esencial conocer el comportamiento de las piezas y el mortero. Así como el comportamiento de mampostería no reforzada a compresión y a tensión diagonal ( cortante ). Y poder determinar los mecanismos de falla en la mampostería reforzada.

El análisis de las estructuras de mampostería se realiza mediante el estudio de cargas verticales y horizontales. En el análisis de cargas verticales se hacen varias hipótesis para considerar que los muros únicamente son afectados por estas cargas. En el análisis de cargas horizontales se pueden encontrar tres métodos el simplificado, análisis estático y el dinámico. Dependiendo de la importancia o del grado de exactitud se puede elegir uno de estos tres métodos para el análisis de cargas laterales.

La evaluación de estructuras de mampostería es de vital importancia, por medio de esta se analizará a la estructura a rehabilitar y el daño que presente. Se debe de recopilar todos los datos documentales, inspecciones y pruebas para un proyecto confiable de rehabilitación.



El daño más evidente en las estructuras de mampostería es el agrietamiento, estas se pueden clasificar de distintas formas. Las grietas nos pueden dar una idea del daño que tienen las mamposterías y su causa. Así mismo existen distintos tipos de pruebas para detectar las grietas o materiales débiles en los muros de mampostería.

En las técnicas de rehabilitación se puede encontrar;

a) El reemplazo de piezas y concreto, generalmente utilizado en estructuras severamente dañadas. b) El relleno de grietas con materiales epóxicos, lechada de morteros (inyección), colocación de rajuelas, c) Colocación de barras de refuerzo como grapas y en las juntas de la mampostería, d) el encamisado de muros con mallas metálicas o con materiales plásticos, e) adición de dadas y castillos.

A lo largo de la historia en todo el mundo las construcciones de mampostería han sufrido deterioro o daños por causa de los sismos. De este hecho surge la necesidad de estudiar la forma de reparar o reforzar los muros de mampostería (rehabilitar). En México y otros países se han desarrollado programas de investigación para evaluar la factibilidad y las diversas propuestas de rehabilitación de muros de mampostería. Dentro de estas se encuentran las mencionadas en el párrafo anterior.

De tal forma se puede decir que el método de encamisado con malla metálica en combinación con el relleno de grietas, aplicado correctamente, permite aumentar la resistencia ante cargas laterales, aumentar la rigidez, así como la capacidad de deformación y disipación de energía.

En cuanto a los costos es una de las técnicas de rehabilitación más económica y que requiere de una menor supervisión en comparación con la colocación de barras en las juntas o del encamisado de muros con materiales plásticos. Sin embargo en las normas vigentes no se cuenta con recomendaciones para la elección y correcta aplicación de estos métodos de rehabilitación.

## Bibliografía

- 1) Alcocer Martínez de Castro, Sergio M.  
Comportamiento dinámico de Muros de mampostería Confinada.  
México, C.U. Serie Instituto de Ingeniería, octubre 1999.  
112 p.
- 2) Aguilar, G.  
Efectos del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería ante cargas laterales.  
México, Ed. CENAPRED.
- 3) Araiza Márquez, Marcos Alberto.  
Estudio paramétrico de la influencia de la densidad de muros en el comportamiento sísmico de muros de mampostería.  
México, C.U. Facultad de Ingeniería.
- 4) Basilio Sánchez, Ismael.  
Comportamiento ante cargas laterales alternadas de muros construidos con bloques.  
México, C.U. Facultad de Ingeniería.
- 5) Bazan, Enrique; Meli, Roberto.  
Diseño Sísmico de Edificios.  
Ed. Limusa, México Tercera Ed.
- 6) CENAPRED.  
Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores responsables de obra.  
México, Ed. CENAPRED.
- 7) CENAPRED.  
Seguridad sísmica en la vivienda económica (Cuaderno de Investigación No. 17 Muros de mampostería confinada).  
México, Ed. CENAPRED.
- 8) D.D.F.  
Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de estructuras de Mampostería.  
México D.F. 1993.
- 9) D.D.F.  
Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.  
México D.F. 1993.
- 10) De Buen, Oscar.  
Apuntes de diseño estructural.  
México C.U. Facultad de Ingeniería.
- 11) Departamento de Ingeniería Aplicado de Cimentaciones S.A.  
Refuerzos de estructuras con fibra de carbono.  
[www.construir.com/ecosult/construir/nro63/document/refuerzo.htm](http://www.construir.com/ecosult/construir/nro63/document/refuerzo.htm)

- 12) Fisher, Roberto.  
Paredes.  
Madrid, España, Ed. Blume 1976.
- 13) Fundación ICA.  
Edificaciones de mampostería para vivienda.  
México, Ed. Fundación ICA 2001.  
317 p.
- 14) González Gottdiener, Isaura.  
Para conservar el pasado.  
[www.imcvc.com/cvt/oct02/conservar.htm](http://www.imcvc.com/cvt/oct02/conservar.htm)
- 15) Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C.  
Diseño y Construcción de estructuras a base de concreto (ACI-531).  
México, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.
- 16) Maldonado, Julieta.  
Reparar y hacer más resistentes los muros a los sismos.  
[www.imcvc.com/oct02/reparar.htm](http://www.imcvc.com/oct02/reparar.htm)
- 17) Meli Piralla, Roberto.  
Comentarios y ejemplos de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, D.D.F. No. E54.  
México, C.U. Instituto de ingeniería, 1992.  
62 p.
- 18) Meli Piralla Roberto.  
Diseño Estructural.  
México 1989, Segunda Ed. Limusa  
582 p.
- 19) Meli Piralla, Roberto.  
La rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México.  
[www.fundacion-ica.org.mx/con-frames/ingenieria\\_estructural.htm](http://www.fundacion-ica.org.mx/con-frames/ingenieria_estructural.htm)
- 20) Meli Piralla, Roberto.  
Mampostería Estructural, Cuaderno de Investigación No. 17.  
CENAPRED julio 1994.
- 21) M. Alcocer, Sergio.  
Comportamiento de la estructura tridimensional de mampostería confinada de muros de dos niveles.  
México, Ed. CENAPRED.
- 22) Microsoft.  
Enciclopedia Encarta 2001 Edición Básica.  
Estados Unidos 2001. Microsoft.

- 23) Rosenblueth, Emilio.  
Diseño de Estructuras Resistentes a Sismos.  
México, Ed. Instituto del Cemento y el Concreto A.C. 1982.
- 24) Ruiz, J.  
Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural.  
México, Ed. CENAPRED.
- 25) Robles, Francisco.  
Apuntes de Mecánica de Materiales.  
México, C.U. Facultad de Ingeniería UNAM.
- 26) Sánchez Pérez, Alberto Tomas.  
Comportamiento de estructuras de mampostería confinada sujetas a cargas laterales.  
México, ed. CENAPRED.
- 27) Sánchez Pérez, Alberto Tomas.  
Respuesta sísmica de muros de mampostería confinada con diferentes tipos de refuerzo horizontal.  
México, Ed. CENAPRED.
- 28) Trill, John; Bawger, Jack  
Construcción, el caso de la esquina rota y otros problemas constructivos.  
Barcelona, Ed. Gustavo Gili S.A. 1987.  
167 p.
- 29) Velázquez Dimas, Juan Ignacio.  
Nueva tecnología para reparar edificios de mampostería para resistir terremotos.  
Submitted for review on publication.  
to ACI structural Journal 1998.
- 30) Villasante Sánchez, Esteban.  
Mampostería y Construcción.  
México D.F., Ed. Trillas, 1ª. Edición 1995.  
420 p.
- 31) Wakabayashi, Minora; Martínez Romero, Enrique.  
Diseño de Estructuras Sismo resistentes.  
México, Ed. Mac Graw Hill 1988.  
418 p.