

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO**

***DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL***

TESINA PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD

DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

**MARÍA DE LA LUZ ZAVALA VILLAGÓMEZ**

***“ANÁLISIS Y RESTAURACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA  
DAÑADAS POR SISMO”***

ASESOR:

**DR. JOSÉ DE JESÚS ÁLVAREZ SERENO**

**MORELIA, MICHOACÁN**

**ENERO DE 2007.**

## **GRACIAS**

A Dios.

A mi esposo Ing. Juan Gerardo Ponce de León López.

A mis padres Ing. J. Jesús Zavala Gutiérrez y  
María de la Luz Mónica Villagómez Salgado.

A mis hermanas Rocío, Mónica y Patricia.

A mi asesor Dr. José de Jesús Álvarez Sereno.

## ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. METODOLOGÍA	6
IV. MATERIALES COMUNES EN LA MAMPOSTERÍA	7
V. RIESGO SÍSMICO	9
VI. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA	11
VII. EJEMPLO DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	14
VIII. PRUEBAS	15
i. Pruebas No Destructivas	15
ii. Pruebas <i>In Situ</i>	17
iii. Pruebas Destructivas	17
IX. TÉCNICAS DE REPARACIÓN	19

i.	¿Qué Tipo de Grietas se Pueden Reparar?	19
ii.	Reparación de juntas	20
iii.	Reparación de Piezas Deterioradas de Mampostería	21
iv.	Reparación de Grietas por Medio de Materiales Compuestos	22
v.	Inyección de Grouting	23
vi.	Reparación de Mampostería	24
vii.	Reforzar la Mampostería por Medio de Elementos Adicionales	26
viii.	Empleo de Marcos Estructurales Adicionales	27
X.	EJEMPLOS DE RESTAURACIÓN	31
i.	Columnas de la Catedral y Sagrario Metropolitano	31
ii.	Trabajos de Conservación y Restauración en la Pirámide de las Serpientes Emplumadas, Xochicalco, Morelos	32
iii.	Obras de Restauración del Carolino	34
iv.	Espacio Cultural y Educativo Betlehemitas	35
XI.	REGLAMENTACIÓN	37

i. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo	37
ii. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería	38
XII. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	45

## I. INTRODUCCIÓN

Los edificios históricos representan la cultura del hombre y su evolución, las antiguas construcciones son parte fundamental de la historia de la humanidad, éstas han sido elaboradas de acuerdo al conocimiento en las técnicas constructivas que se tenía en determinada época.

Las construcciones antiguas de mampostería son en su mayoría espectaculares y maravillosas y aun en nuestros días causan asombro y admiración. Los materiales con los cuales se elaboran estas obras son diversos y sus características varían de acuerdo al tipo de elemento empleado, tanto en su estética como en su capacidad estructural. Las más antiguas han sido elaboradas en mampostería de diversos materiales, tales como la arcilla, mármol, cantera, tabiques, etc.

Las técnicas constructivas en mampostería así como el proceso de elaboración de materiales tales como el tabique o los elementos aglutinantes han ido evolucionando a través de los siglos y ha hecho que las construcciones sean más versátiles.

En un principio, los conocimientos eran transmitidos y las estructuras se hacían a sentimiento, usando normas establecidas de los maestros a los discípulos. Las primeras construcciones de mampostería de ladrillo reforzada se realizaron durante el siglo XIX por Marc Isambar Brundel (Inglaterra, 1825), pero sin una explicación científica. La preocupación por reglamentar y dar una

seguridad estructural a este tipo de construcciones ha ocasionado la creación de códigos especializados que dan pautas prácticas tanto de construcción como restauración. En Estados Unidos de América es hasta el año de 1944 que aparece el primer reglamento especializado en construcciones de mampostería, el *American Standard Building Coderequiriments for Mansonry*, que únicamente menciona el diseño empírico de estructuras de mampostería sin refuerzo.<sup>1</sup>

Uno de los grandes problemas a los que se enfrentan las construcciones de mampostería es al daño ocasionado por sismo, existen zonas geográficas que son propensas a que las construcciones se encuentren bajo eminente daño sísmico. De todos los desastres, la mayor cantidad de pérdidas humanas es debida a terremotos, que deja ver la fragilidad de las construcciones. Los sitios mas afectados son África, Asia, centro y sur América. Durante los más recientes sismos, la mayor parte de pérdidas humanas ha sido asociada a fallas estructurales de muros de mampostería.<sup>2</sup> Se vuelve entonces de gran importancia el restaurar estructuras existentes de mampostería, pero principalmente hacer un diseño basado en tales fenómenos dado que es menos costoso prevenir.

En el caso de la restauración de muros de mampostería dañada por sismo es necesario saber el estado del inmueble que deseamos restaurar y para tal fin existen métodos que van desde muy sencillos y prácticos hasta otros que son sofisticados.

---

<sup>1</sup> Newman, Alexander, P. E. (2001) p. 518.

<sup>2</sup> [Http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap](http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap)

La restauración entonces consiste en hacer un estudio a conciencia que permita conservar la construcción el mayor tiempo posible, por lo que es necesario evaluar las características estructurales del inmueble y revisar la resistencia en cada uno de los elementos que la conforman.

En la restauración también son importantes aspectos tales como; conservación histórica, uso del inmueble, costo de ejecución de la obra, mantenimiento, etc.

Existen métodos que ayudan a solucionar y reparar problemas estructurales, métodos que en algunas ocasiones son técnicas tradicionales y otros mas complejos que buscan la solución al problema por medio del uso de químicos y en otros casos el uso de la adición de elementos estructurales.

## II. OBJETIVOS

Los objetivos para llevar a cabo esta investigación se basan principalmente en que México tiene un enorme tesoro cultural y arquitectónico en sus construcciones de mampostería como en el caso de las ciudades de Morelia, Mich., Guanajuato, Gto., Puebla, Pue., entre muchas otras. El tratar de conservarlas para generaciones futuras es uno de los principales objetivos de la UNESCO y del gobierno que para este fin designan fuertes cantidades de dinero.

Si consideramos que México por su situación geográfica cuenta con zonas de elevada peligrosidad sísmica y que en la mayoría de las ocasiones los inmuebles no cuentan con un adecuado diseño estructural, hace necesario que los inmuebles que se restauran tengan un adecuado análisis para que se revise la resistencia y de tener un inminente riesgo de colapso se refuerce y se pueda conservar el patrimonio durante mas tiempo.

Dado que los materiales empleados en mampostería tienen un gran uso en las estructuras debido a sus cualidades térmicas, acústicas, permeables y que además lo hacen un elemento estructural es necesario un correcto análisis después de que los elementos han sido dañados por sismo y se le de una correcta restauración, esto con el fin de que las estructuras sean habitables y se disminuya al máximo el riesgo sísmico.

Los edificios antiguos representan la cultura del hombre, el preservarlos de forma intangible es muy complicado dado que muchos están elaborados en mampostería y su diseño no estaba sujeto a fenómenos naturales como los sismos. Una de las principales tareas de la restauración de monumentos históricos es la conservación pero también la habitabilidad del inmueble y si además éste se puede hacer seguro ante sismo es una ventaja enorme, aunque existen limitantes dentro de las normativas para cambiar el tipo de estructuración y dejar en medida que sea posible el inmueble intacto. Entonces un correcto análisis de los posibles métodos de restauración dadas las causas que originan el daño hace posible una optima intervención en el inmueble.

### III. METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta investigación se basa en una revisión exhaustiva de los documentos bibliográficos y buscadores en la red que mencionaran artículos relativos al tema.

Una vez que se hubo obtenido suficiente información del tema se paso a ordenarlo de acuerdo a si era de métodos de análisis, procesos de restauración, etc.

Los elementos que se emplearon para clasificar la información son la claridad con que se abordaba el tema y las características que mencionaba del tema.

En algunos casos se emplearon imágenes de los documentos revisados que complementan el presente trabajo.

También se reviso información relativa a los sismos para demostrar la importancia de esta investigación.

#### IV. MATERIALES COMUNES EN LA MAMPOSTERÍA

Las edificaciones más antiguas que se conocen están hechas a base de mampostería de diversos materiales, los mas comunes son:

- Las *rocas naturales* debido a su abundancia hacen que sean empleadas en muchas de las construcciones. Se clasifican en rocas ígneas (resinto, granito, tezontle, cantera, chiluca, etc.), sedimentarias (tepetate) y metamórficas (mármol).<sup>3</sup> Es un elemento que puede tener una resistencia muy elevada, como el caso del mármol y el granito, estéticamente son espectaculares y tienen además propiedades acústicas y térmicas.
- *Adobes*, que tienen características no solo estructurales sino además térmicas. Su facilidad de elaboración lo ha hecho un material de gran uso aun en nuestros días.
- *Tabique o ladrillos*, estos han tenido una enorme evolución a lo largo de la historia, su proceso constructivo ha mejorado a pasos agigantados en las ultimas décadas, el implementar los tabiques extruidos ha hecho que se vuelvan aun mas versátiles y ligeros.
- *Bloques y tabicones de concreto* es uno de los materiales más comúnmente empleados a últimas fechas dado su bajo costo debido a la elaboración en serie. Se elabora a base de cemento Pórtland y arena.

---

<sup>3</sup> Prado Nuñez, Ricardo (2000) p. 26.

Su calidad depende de los materiales de elaboración y tiene tantos diseños y tamaños como se requiera. Pueden ser macizos o huecos y sus dimensiones por lo general son mayores a los tabiques.<sup>4</sup>

Un material fundamental que ha ido evolucionando y que no puede pasar desapercibido es el *mortero*, este elemento es elemental en la elaboración de estructuras de mampostería. Los primeros morteros fueron hechos a base de arcillas, posteriormente se empleo la puzolana y actualmente el cemento Pórtland que da una mayor resistencia.

En conclusión, la mampostería es un elemento que tiene capacidad estructural, además es estético, acústico y térmico lo que lo hace un elemento en la construcción muy solicitado (Fig. 1).

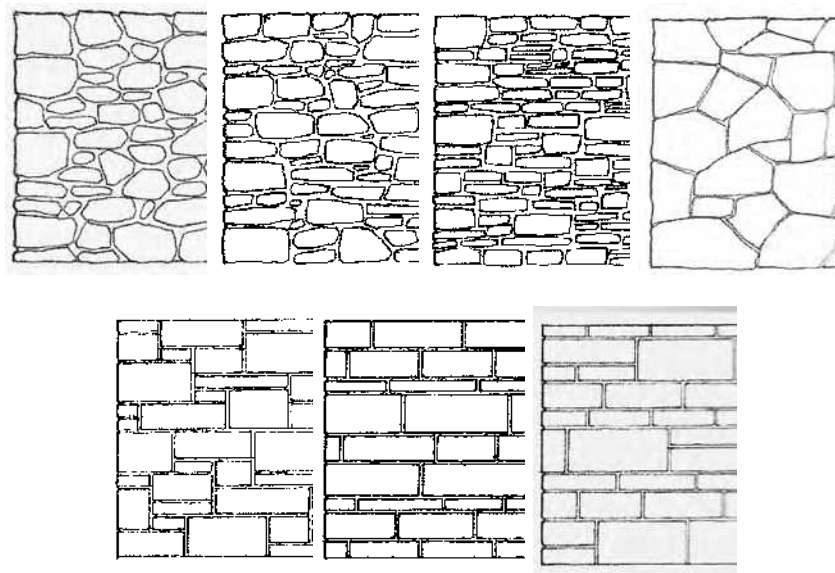


Figura 1. distintos modos de hacer la sillería de mampostería.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Gallo Ortiz, Gabriel O., *et al* (2005) p.10.

<sup>5</sup> Ching, Francis D. K. (1998) p. 20.

## V. RIESGO SÍSMICO

Los terremotos son el resultado de cambios naturales y tectónicos, como tales no son catastróficos. Su mala imagen proviene de las destrucciones en asentamientos urbanos, en los que las construcciones se derrumban debido a las fuerzas generadas por este fenómeno. Sin embargo esta destrucción no debe acatarse a tales fenómenos, si no mas bien a las construcciones, que no han sido diseñadas para tener un comportamiento optimo bajo tales circunstancias.<sup>6</sup>

En México los sismos de gran magnitud ocurren en su mayoría en la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica. La línea donde comienza la subducción se encuentra entre Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán. Por lo que allí es donde se localizan la mayor parte de los epicentros.<sup>7</sup>

La peligrosidad sísmica la podemos definir como el nivel de movimiento que en el terreno puede darse en un período de tiempo determinado a consecuencia de un acomodo de la corteza terrestre.

En el caso de México se tiene en su mayoría un riesgo de moderado a muy alto lo que hace que las construcciones lleguen a tener fallas ocasionadas por este fenómeno (Fig. 2).

Muchas construcciones son vulnerables a los sismos, principalmente las que se construyen en zonas rurales y semiurbanas, en las que el número de

---

<sup>6</sup> [Http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap](http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap)

<sup>7</sup> Meli Piralla, Roberto (1991) p. 398-401.

edificaciones que no cuentan con una supervisión especializada va en aumento, es por tanto necesario implementar mecanismos de restauración y rehabilitación para que las estructuras soporten futuros sismos.

En el caso de edificaciones de mampostería dañados por sismo los daños a consecuencia de sismos fuertes son severos. La mampostería como material de construcción no resiste esfuerzos a tensión y su falla es por lo general de tipo frágil lo que la hace sensible a daños por sismo, pero si se lleva a cabo un buen diseño en el que se refuerce y se de confinamiento se pueden superar estos inconvenientes.<sup>8</sup>

Algunas consideraciones que se pueden hacer son simples como; evitar la delaminación en construcciones de piedra, incrementar los llamados cinturones sísmicos, aumentar el confinamiento, etc.

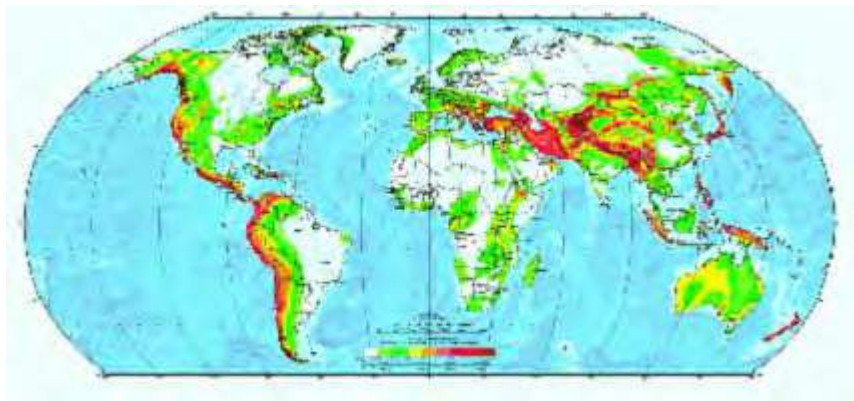


Figura 2. Mapa de riesgo sísmico.<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Meli Piralla, Roberto (1991) p. 398-401.

<sup>9</sup> [Http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap](http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap)

## VI. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA

Lo principal en una evaluación es conocer el tipo de piezas y mortero empleados para la mampostería, así como su condición y rigidez. Actualmente se pueden seguir ciertos pasos para evaluar el estado de daños de una construcción de mampostería para posteriormente tomar las medidas adecuadas para su correcta restauración.

El primer paso es localizar toda la información de la construcción; planos estructurales, memorias de cálculo y bitácoras de obra, etc. Esto con el fin de determinar posibles debilidades, conexiones cruciales, modificaciones y/o ampliaciones, así como cambios en su uso (Cuadro 1).<sup>10</sup>

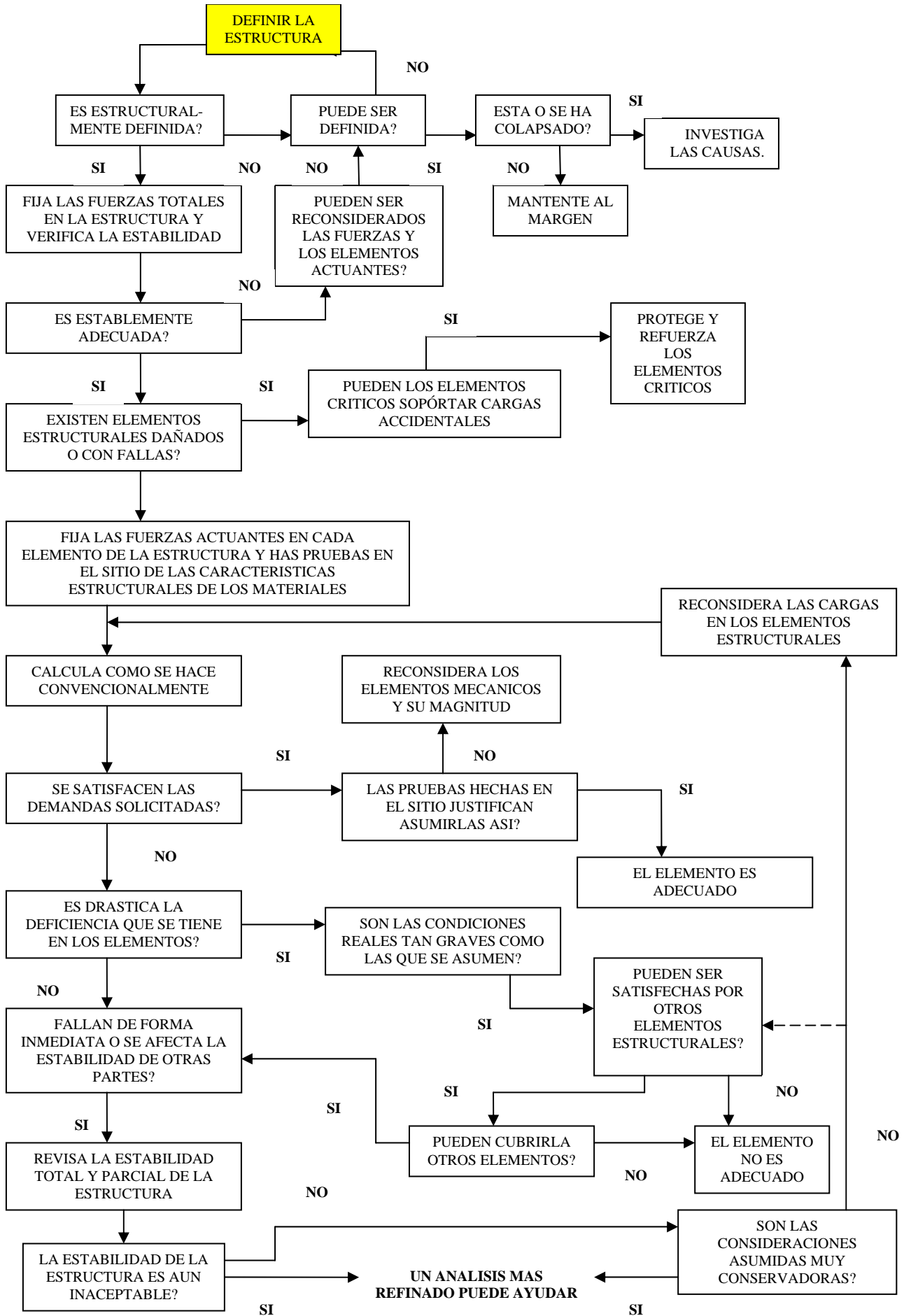
La evaluación visual es uno de los pasos fundamentales, es simple debido a que por este podemos identificar detalles característicos de las fallas en la estructura como grietas, humedades, piezas faltantes, ampliaciones, demoliciones, etc. La mayoría de los daños son ocasionados por:

- Cambios volumétricos de los materiales.
- Las diferencias del comportamiento de las piezas y el mortero
- Humedad
- Fuerzas externas que pueden ser sísmicas

---

<sup>10</sup> Rabun, J. Stanley (2000) p. 5-7.

Cuadro 1. Modelo de evaluación de estructuras de mampostería.



VI.

Lo ideal al momento de hacer el recorrido es encontrar los miembros críticos que están dañados y si existe algún riesgo en la estructura.

Algunos elementos específicos que pueden evaluar en la exploración son:

- Equipo para visualizar.
- Localizar los accesos.
- Medir el inmueble para revisar distorsiones y deformaciones.
- Detección de corrosión de elementos de acero, humedad, grietas, faltantes de piezas, incendios, etc.
- Modificaciones en la estructura.

## VII. EJEMPLO DE EVALUACION ESTRUCTURAL

Únicamente para ejemplificar se toma uno de los análisis que se realizan en el libro de 'Structural Analysis Of Historic Building ' de un edificio comercial de tres niveles con muros de mampostería los cuales son revisados.

El edificio esta ubicado en Chicago Illinois.

Los datos son los siguientes:

Nivel		Espesor	Altura
Primero		16 in	18 ft
Segundo		12 in	15 ft
Tercero		12 in	13 ft
Parapeto o cornisa		12 in	3 ft

Los demás datos están plenamente explicados en las siguientes graficas tomadas del libro de referencia.

## VIII. PRUEBAS

### i. Pruebas No Destructivas

Estas pruebas son similares a las empleadas en concreto, pero se tienen ciertas particularidades. Algunas de ellas son:

- Superficie de esfuerzos, que sirve para evaluar la resistencia de las piezas debido a su uniformidad.
- Ondas de esfuerzo, nos da la densidad y calidad de materiales empleados en la mampostería, estas pueden ser por métodos de ultrasonido o velocidad de onda (Fig. 3).

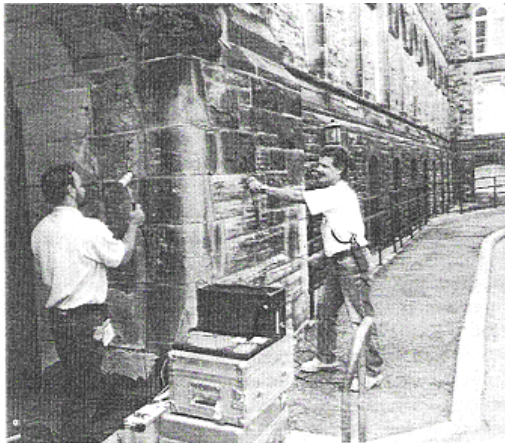


Figura 3. Toma de la prueba de velocidad de impulsos mecánicos en un edificio de mampostería (*Stress waves*).

- El borescopio, ve a través de las grietas, detalles y presencia de socavaciones y discontinuidad (Fig. 4).



Figura 4. Prueba con el borescopio.

- Imagen térmica, con el uso de cámaras infrarrojas se determinan condiciones internas del material detectando cambios de composición o irregularidades.
- Métodos magnéticos para la localización de barras, estos métodos magnéticos localizan elementos de acero para refuerzo por medio de un tacómetro (Fig. 5).



Figura 5. Prueba con el tacómetro.

- Examinación petrográfica, establece la composición de la mampostería químicamente.
- Prueba de penetración de agua, evalúa la permeabilidad de la mampostería, que depende de la condición de las juntas (Fig. 6).

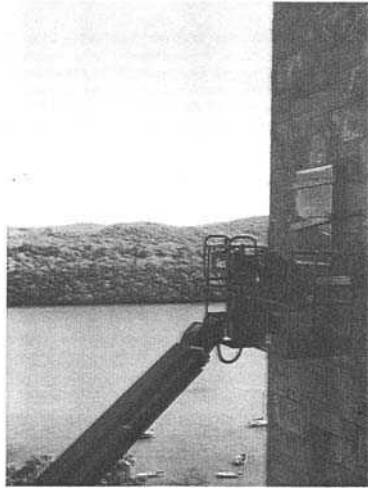


Figura 6. Prueba de penetración de agua.

## ii. Pruebas *In Situ*

Las pruebas que se pueden realizar en el sitio son de determinación de cortante, rigidez capacidad al corte, a flexión, modulo de elasticidad y deformabilidad del material.

## iii. Pruebas Destructivas

Si los resultados de las pruebas hechas en el sitio y no destructivas no dan la información deseada, una prueba simple y definitiva que es destructiva puede dar la información que deseamos. Estas pruebas en general consisten en llevar

partes de la estructura y analizarlas en el laboratorio, generalmente deben ser tomadas áreas con deterioro y sin el para tomar un parámetro de comparación.

Este tipo de pruebas nos da toda la información que se requiere tanto de las piezas como del mortero, tales como resistencia estructural. Cabe destacar que este tipo de pruebas están normalizadas por códigos (Fig. 7).

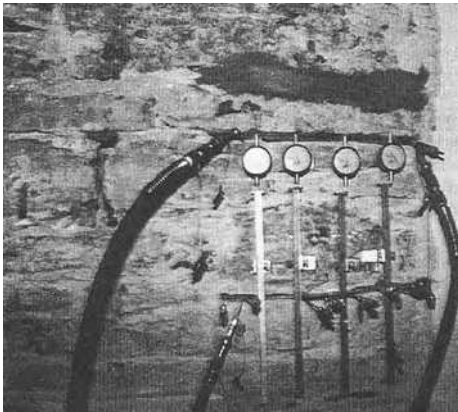
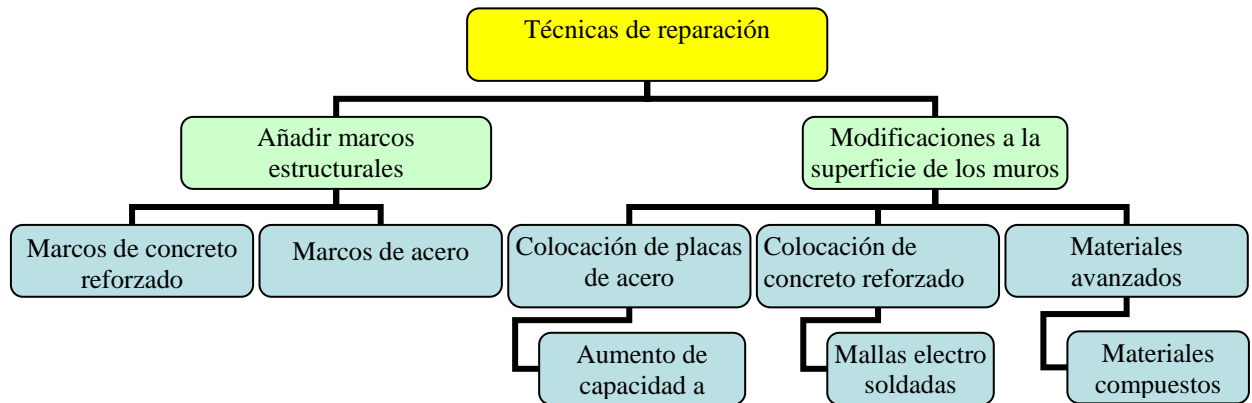


Figura 7. Prueba de deformación por *flatjacks*

## IX. TÉCNICAS DE REPARACIÓN



### i. ¿Qué Tipo de Grietas se Pueden Reparar?

No todas las grietas se pueden reparar debido a que muchas dañan las piezas de mampostería. En general todas las grietas que ocurren a lo largo de las juntas se pueden reparar, esto es debido a que existen muchas razones para que el mortero se desgaste y falle o se agriete. La ausencia de grietas en las piezas da un indicio del mal estado del mortero. Las grietas menores a 0.005 in (0.013 cm), pueden ser fácilmente reparables.

Es importante determinar si la causa de la grieta fue temporal o esta activa, una simple prueba de muestreo a base de parches de yeso nos puede dar una idea del comportamiento de la grieta o se puede recurrir a pruebas mas sofisticadas.

## ii. Reparación de juntas

Las causas de deterioro del mortero son entre otras:

- Humedad, viento y contaminación.
- Falta de cemento.
- Una inadecuada colocación.

El proceso se realiza primero retirando el mortero agrietado o dañado, las piezas se limpian entonces ya sea con presión de agua principalmente y posteriormente se lleva a cabo la colocación de el nuevo mortero. El reponer mortero ayuda a los esfuerzos, color y textura de la estructura. .

Los morteros antiguos generalmente son mas suaves por lo que al momento de colocar un mortero nuevo se deben tomar consideraciones que no hagan que los esfuerzos que se ocasionen en la estructura a dañe, esto es debido principalmente a que este material y las piezas no tiene el mismo comportamiento.

Sismicamente esto nos va a ayudar a perder confinamiento de las piezas y que no exista perdida de rigidez en la estructura.

Para reconocer en una construcción el tipo de mortero que se ha empleado, es necesaria la observación del color de este, se puede afirmar que un mortero es gris y su escala de colores esta definida por la cantidad de cemento

empleado en el, entre mas oscuro se observe mayor cantidad de cemento se tiene.

El mortero dañado se restaura usualmente sustituyéndolo, esto se hace en tres partes, primero se retira una parte del mortero, se limpia la superficie y se coloca un nuevo mortero, y se repite por la parte interior. El nuevo mortero puede cambiar la rigidez y apariencia del muro.

### iii. Reparación de Piezas Deterioradas de Mampostería

Todas las piezas y materiales empleados en mampostería se deterioran con el tiempo, estas requieren mantenimiento y restauración. Las causas mas comunes son; desmoronamiento, escamado o ruptura.

La coloración de las piezas nos puede dar una idea aproximada del índice de deterioro de la estructura, esto hace necesario en algunas ocasiones



Figura 8.  
Restauración en obra.

que sean sustituidas partes de la estructura o solamente piezas de ella.

El método mas directo es el reemplazar las piezas dañadas, la facilidad depende de la facilidad de obtención de las piezas, buscando que estas sean iguales en apariencia y en propiedades. También se puede remover la pieza y rotarla 180° para proporcionar la resistencia requerida (Fig. 8).

Cuando se realiza este tipo de restauración, es conveniente poner el mismo tipo de mortero y de pieza, la selección de las piezas se hace con una coloración ya definida de acuerdo a las características de la estructura y del material.

El mortero debe ser de preferencia el mismo que el original, si es necesario se realizaran estudios de laboratorio con el fin de obtener la mezcla adecuada. La finalidad de tomar en cuenta estas características es debido a que no se deben alterar las condiciones estructurales existentes para evitar cambios de rigidez que hagan que la estructura pueda volverse inestable.

La revisión de la estructura se debe hacer de tal forma que los elementos estructurales sustituidos puedan considerarse como parte de la estructura original y su revisión se hace de acuerdo a las consideraciones establecidas por reglamento, comentadas posteriormente en el ultimo capitulo.

#### **iv. Restauración de Grietas por Medio de Materiales Compuestos**

Las fallas en flexión de muros de mampostería causadas por fuerzas inerciales perpendiculares al plano de el muro durante sismos, es una de las principales causas de perdidas humanas por colapso de edificios.

Los materiales compuestos fueron diseñados con fines militares, se han empleado exitosamente pos más de 40 años en la industria aeronáutica. Estos materiales están formados por fibras muy resistentes tales como; fibra de

vidrio, carbón o aramid, estas fibras son unidas por resinas que pueden ser epóxicas o poliéster.

Se ha demostrado que añadir pequeñas tiras de material compuesto a la superficie de muros débiles de mampostería, el comportamiento frágil y quebradizo se puede transformar en uno muy resistente y con mucha capacidad a deformación como lo demostró dentro de las investigaciones de su tesis doctoral el Dr. Juan Ignacio Velásquez Dimas.

Las fibras de vidrio unidas con resina epóxica tienen una resistencia y ductilidad excelentes y son capaces de soportar hasta treinta veces su propio peso, experimentando deflexiones hasta del 5% de la altura del muro, con esto se asegura que el requerimiento sísmico establecido por los códigos son satisfechos con creces.

#### **v. Inyección de *Grouting***

La inyección de *grouting* a presión soluciona un gran número de problemas estructurales, debido a que incrementa la rigidez y capacidad a flexión de los muros de mampostería. Se debe buscar que el material que se inyecte en las grietas sea de fácil manejo y se expanda al secado.

Existen muchas formulaciones para estos compuestos dependiendo del fabricante y su composición, pero las características del material que busquemos se deben de ajustar a las necesidades de la obra.

Kariotis y Roselund hicieron mezclas de cemento Pórtland, limos hidratados tipo 's' y 'f' en proporción 1:1/2:1/2 para reparar daños sísmicos en mampostería no reforzada en el sur de California, esta mezcla se inyectó principalmente en las juntas que eran de ½ a 1". Se vio que el material en cuestión en ocasiones causaba más daño de lo que ayudaba, debido a que no se consideró las propiedades de las piezas de cada una de las obras. El más obvio de los problemas fue la presión adicional que se tenía por el tipo de inyección a presión. También se determinó que en la mayoría de los casos es preferible que el material sea con baja absorción de humedad debido a que este factor reduce la presión hidrostática y previene daños en las piezas debido a humedades.

## **vi. Reparación de mampostería**

### **1. Reparación de grietas verticales**

Si las grietas son causadas por humedad o movimiento térmicos, la reparación puede incluir reparar las juntas o introducir un material que reduzca tal comportamiento.

Las grietas verticales también pueden corregirse si se colocan barras de acero en las juntas horizontales interceptando la fractura. El acero se debe de colocar en la junta previamente limpia y se debe colocar un material resistente para cubrirla y darle rigidez. La longitud de la barra tiene que ser la suficiente para soportar los esfuerzos para que el material fluya.

## 2. Grietas verticales ocasionadas por insuficiente capacidad estructural.

Estas se ocasionan por presiones laterales generadas por sismo o viento, las cuales exceden la capacidad estructural del elemento, usualmente por un diseño erróneo de la estructura o materiales de poca calidad.

Este tipo de fallas en general requiere de la demolición parcial o total del elemento estructural, la cual se debe sustituir por material muy similar con características estructurales similares a las que se tienen. En ocasiones es necesario restaurar desde la cimentación.

Otro método es modificar una extensión mínima con ayuda de un barrenador e inyectando en las grietas una solución a base de cemento que no tenga cambios volumétricos (*nonshrink grout*), soluciones epóxicas u otro material similar. También se puede extender el muro para otorgar mayor rigidez lateral.

Un método que es efectivo es la colocación de placas de acero, esto posterior a resanar la grieta, que ayuda para dar un aumento de rigidez. Las placas se deben proteger de la intemperie, calcular por pandeo debido a solicitaciones sísmicas y los pernos deben ser revisados para soportar las demandas.

### 3. Reparación de Grietas horizontales y diagonales

Lo primero es determinar siempre las causas que originan la grieta para evitar que crezca. Este tipo de grietas son generalmente el resultado de flexión debida a sollicitaciones sísmicas. Su restauración es difícil debido a la irregularidad de las grietas. Es recomendable reemplazar el muro a menos que los daños sean mínimos.

#### **vii. Reforzar la Mampostería por Medio de Elementos Adicionales**

Muchas edificaciones se ven falladas por sismo o viento debido a que son incapaces de soportar las sollicitaciones de estos fenómenos, en muchas ocasiones el reparar los daños es insuficiente para tener una seguridad estructural aceptable por lo que se requieren métodos que sean mas efectivos.

- Aumento de barras rigidizantes de acero

Las capacidades de flexión y cortante pueden ser las adecuadas a las contenidas en los códigos si los muros contienen algunas barras de refuerzo. Esto es posible por métodos como;

- Uno es insertándolas en el lado que se requiera, haciendo cortes verticales en el muro y cubriéndolas, pero esto representa un problema debido a que se fractura el muro y se puede crear inestabilidad en la estructura.

- Otro método es insertando en el corazón del muro barras verticales en la parte extrema del muro o a cierta distancia que requiera para proporcionar mayor resistencia al corte, flexión y dan confinamiento.
- Existe uno muy similar al anterior en el que se tensiona la barra, que se inserta en orificios en el corazón del muro, estas barras concentran toda su capacidad en tensión y permanece elástico, y su rigidez y deflexión lateral puede obtenerse empleando métodos convencionales. El numero de barras requerido puede ser menor que el del método anterior.

En algunas ocasiones ninguno de los métodos anteriores son suficientes para proporcionar la resistencia que se requiere

#### **viii. Empleo de Marcos Estructurales Adicionales**

Un estudio racional puede arrojar un estado estructural para cargas fuera del plano o sísmicas que la capacidad estructural no puede soportar.

La capacidad estructural puede ser ampliamente incrementada si se emplea una estructuración adicional, uno de los métodos es incrementar el espesor del muro o disminuir el peralte. Esto se puede hacer aumentando un muro del mismo material al existente y ayudar a este nuevo dando confinamiento con elementos de acero o concreto reforzado.

Cuando se ha agregado un muro o se ha incrementado el espesor de uno existente, la revisión se hace mediante el método de la diagonal equivalente y se revisan las solicitaciones sísmicas.

Otro método es el empleo de puntales de metal, que ayudan en las cargas horizontales y verticales que demanda un muro.

También se pueden agregar marcos de concreto reforzado, que cumplen la misma función que los apuntalamientos. En estos métodos es conveniente revisar la compatibilidad de la estructura nueva con la existente y si es necesario para soportar la nueva estructura se realiza una cimentación adicional.

Estos métodos pueden ser empleados en cualquier tipo de estructura de mampostería siempre y cuando no se produzca una inestabilidad en ella y se revise completamente la compatibilidad entre el elemento de refuerzo y el existente.

Un método alternativo consisten reconstruir parte de la estructura haciendo posteriormente una predistribución de las fuerzas que soporta la estructura.

Adicionar muros de cortante y columnas es algo que se puede realizar para que una construcción cumpla con las solicitaciones establecidas en los códigos.

De igual modo se debe verificar que la estructura adicionada sea compatible a la existente ((Tabla 2).

En algunos casos esto se complica por falta de espacio o huecos debidos a puertas y ventanas.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de restauración.

<b>Método de restauración</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Adición de marcos estructurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede aumentar considerablemente la rigidez de la estructura</li> <li>• Aumenta la resistencia</li> <li>• Son sistemas comúnmente empleados</li> <li>• Mejoran el confinamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de peso a la estructura</li> <li>• Modificación de las propiedades sísmicas</li> <li>• En ocasiones, modificación de la cimentación</li> <li>• Altos costos</li> <li>• Tiempos mas prolongados</li> <li>• Estéticamente no son recomendados</li> </ul>
Modificación a la superficie de los muros ya sea mediante la colocación de placas de acero o mediante colocación de concreto reforzado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estéticamente son mas recomendables que añadir marcos</li> <li>• Restituyen la rigidez del muro total o parcialmente</li> <li>• Aumentan la resistencia a flexión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos significativos</li> <li>• Interrupción de las actividades del usuario</li> <li>• Modificación de la rigidez de los muros</li> </ul>
Restauración de grietas por medio de materiales compuestos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son muy resistentes a la tensión</li> <li>• Alta rigidez</li> <li>• No se corroen</li> <li>• Ligeros</li> <li>• Fáciles de instalar</li> <li>• Resistencia elevada a la fatiga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibles a los cambios de humedad</li> <li>• Se dañan con los rayos ultra violeta</li> <li>• Baja resistencia al corte</li> <li>• Comportamiento elástico lineal</li> </ul>

Como se vio anteriormente existen una infinidad de métodos para restaurar grietas y capacidad estructural, lo indicado es siempre tener en

cuenta el tipo de construcción que se esta restaurando, el tipo de uso que se le dará y principalmente hacer un análisis de lo que se busca económica y estructuralmente.

Existen obras que por su índice de daños no pueden ser restauradas y que para su correcto funcionamiento es mejor reconstruir, este parámetro siempre queda en manos del diseñador, por lo que se recomienda tener siempre los parámetros necesarios para dar una correcta evaluación y solución al problema.

Por ultimo es necesario destacar que la mejor solución es aquella plenamente estudiada que resuelve de forma practica y mejor el problema al cual se enfrenta la estructura.

## X. EJEMPLOS DE RESTAURACIÓN

### i. Las columnas de la Catedral y Sagrario Metropolitanos

Se encontró que la composición del núcleo de las columnas se integra por tezontle que alguna vez debió de trabajar conjuntamente con un cementante, el cual al pasar de los años se desintegró, de modo que las porosas piedras estaban sueltas poniendo en riesgo la estabilidad



Figura 9. Vista de la restauración.

del inmueble, para resolver este problema debía ser un material inyectable y de gran fluidez que lograra aglutinar nuevamente el núcleo (Fig. 9).

Se utilizó un producto llamado *Flowcable*, un aditivo que proporciona características especiales al cemento Pórtland, originalmente concebido para inyectarse en los forros de los cables para elementos pretensados. Con la aplicación de este polvo en el mortero, se genera un *grout* bombeable y tixotrópico, con un bajo rango de agua-cemento que proporciona una alta resistencia temprana y una alta resistencia final además de que brinda un amplio tiempo de trabajabilidad.

El material fue sometido a diversas pruebas por parte del Instituto de Ingeniería antes de su aplicación y se le agregaron otros aditivos para bajarle la viscosidad y así hacerlo aún más fluido. Una vez aprobado se inyectó en los núcleos deteriorados recuperando estos la capacidad de trabajo estructural con que fueron concebidos.

Este producto no interfiere químicamente de manera negativa con ningún material usado en la construcción original o en materiales anteriores de restauración y los morteros resultantes de mezclarlo con agua y arena pueden ser utilizados tanto en aplanados como en consolidaciones y junteos

## **ii. Trabajos de Conservación y Restauración en la Pirámide de las Serpientes Emplumadas, Xochicalco, Morelos**

Los muros de este monumento fueron levantados usando para ello grandes bloques de piedra, cortados y trabajados con relieves por la cara que presentarían al exterior. Algunos de ellos tienen un volumen extraordinario con el consiguiente peso.



Figura 10. Vista de la pirámide.

Debe observarse que no siempre el corte de las caras fue perfecto, por tanto existen entre sus aristas separaciones de varios centímetros. Al igual que en todas las construcciones en piedra de Xochicalco, la argamasa empleada fue el lodo (Fig. 10).

En realidad, estructuralmente no era necesaria la utilización de una mezcla de gran fuerza de unión, sino que más que nada serviría en este caso para rellenar huecos y nivelar las superficies, siendo los bloques tan grandes, por gravedad se encuentran perfectamente asentados.

Con seguridad las mezclas que encontramos al exterior del monumento, que retiramos y que estaban compuestas de cal-arena-cemento, fueron en su mayoría las que utilizó en su momento el arqueólogo Batres al efectuar la consolidación y reconstrucción del edificio.

En cuanto al estado de conservación del monumento, si bien se encontraba estructuralmente estable, se mostraba muy alterado visualmente por su parte exterior, debido al efecto natural de haber estado expuesto durante tanto tiempo al medio ambiente.

Una vez limpias las superficies se procedió a la preparación de la argamasa que se utilizaría en el rejunteo de la piedra labrada y no labrada. La mezcla se preparó a partes iguales de cal viva hidratada y arena.

La argamasa descrita se utilizó pues, tanto para sellar los espacios entre bloques de piedra labrada como para el rejunteo de la piedra que no siendo original, forma hoy parte del monumento.

Todo el trabajo se desarrolló procurando que el fraguado de la cal se llevara a cabo en las mejores condiciones, evitando así contracciones por secado brusco y, por tanto, agrietamientos en las pastas.

### iii. Obras de Restauración del Carolino

Fue necesario realizar estudios en Mecánica de Suelos para la rehabilitación del inmueble, por medio de 16 sondeos con equipo especializado; estudio geofísico que permitió conocer las condiciones topográficas y geológicas del terreno en el que se asienta el tercer patio; pruebas a los materiales con que está construido el edificio, a fin de determinar la calidad de los materiales a utilizar (Fig. 11).



Figura 11. Vista de la restauración.

Se reestructuró la escalera principal, además de la recimentación de muros de mampostería, se consolidaron muros anchos, se construyeron arcos de concreto en el Salón de Proyecciones y se reforzaron ventanas y fachada de la calle 4 Sur.

La Biblioteca "Lafragua", así como el Salón "Barroco" recibieron atención especial y con el propósito de prevenir los efectos de otro evento sísmico, se construyeron tres contrafuertes de concreto, hacia el patio del Gimnasio y en el lado poniente, se consolidaron los muros de mampostería y se construyó un arco de concreto en el área del Teatro Universitario y se repuso el decorado del Salón Barroco.

Por otra parte, en el área conocida como "catacumbas", se construyeron arcos de concreto para soportar los muros del nivel superior, se reforzaron dinteles y rescataron bóvedas de arista y cañón.

#### iv. Espacio Cultural y Educativo Betlehemitas



Figura 12. Vista del espacio después de la restauración.

La primera parte del proceso consistió en liberar a la construcción de los añadidos y recuperar el comportamiento original de su estructura, alterado por la inclusión de entresijos para viviendas, por el tapiado de los arcos de los deambulatorios, así como por la apertura de vanos en las fachadas para dar más amplitud a

las vitrinas de los comercios, entre otras modificaciones (Fig. 12).

La afectación causada por los hundimientos diferenciales típicos del Centro Histórico de la Ciudad de México fueron estudiados para este rescate. Los ingenieros estructuristas determinaron que una vez recuperado el comportamiento original de la estructura no era necesario reforzarla, ya que podía resultar contraproducente el uso de elementos de concreto armado y acero cuya rigidez difiere de la de los materiales originales (Fig. 13).



Figura 13. Vista de los frescos originales.

El arquitecto novohispano Lorenzo Rodríguez sólo utilizó una pequeña parte de la cimentación de edificaciones previas a la suya y los elementos restantes fueron de nueva factura con el sistema de estacado prevaleciente en

aquella época. Cabe decir que al tardarse la obra 14 años en su construcción, ésta muestra deformaciones congénitas como muchos otros edificios históricos, sin que esto represente un peligro en la actualidad. Como un elemento de seguridad estructural se integraron sistemas de medición que reportan el comportamiento de la estructura(Fig. 14 y 15).



Figuras 14 y 15. Vista de la construcción luego de la restauración.

## XI. REGLAMENTACIÓN

### i. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

#### Sección 11; Estructuras Existentes

El valor de Q se tomara igual, en términos del Capítulo 5, a menos que se justifique.

Si la estructura tiene un desplome vertical mayor que 0.01 veces su altura, se tomara en cuenta su asimetría multiplicando las fuerzas sísmicas de diseño por  $1+10f$ , para el método simplificado. En el caso del método estático o dinámico modal por  $1+5Qf$ , siendo f el desplome entre la altura.

Este párrafo en particular, trata de tomar los efectos de deformación de la estructura y la amplificación de las fuerzas debido a los efectos llamados p-delta.

Cuando se tenga una construcción del tipo B con elementos adicionales será valido emplear el valor de Q de los elementos, siempre y cuando estos elementos resistan al menos el 50% de la fuerza cortante de diseño.

Deberá comprobarse que los sistemas de piso tienen la rigidez y resistencia suficientes para transmitir las fuerzas que se generan en ellos por los elementos de refuerzo colocados.

## ii. Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería

### Sección 11; Evaluación y Rehabilitación

Se deberá evaluar la seguridad de una estructura cuando se tengan indicios de que ha sufrido algún daño, vaya a sufrir alguna modificación, cambie su uso o se revise el nivel de seguridad (11.2.1)

El proceso de evaluación se realizara con(11.2.2):

1. documentación de la estructura incluyendo los daños que ha sufrido
2. clasificación del daño, modo de comportamiento y severidad
3. estudio de los efectos del daño estructurales.

También propone recolectar información básica tal como(11.2.3.1):

1. memorias, especificaciones y planos de la construcción
2. registros de inspección de obra
3. propiedades de los materiales y del suelo (11.2.3.2)
4. alcance y magnitud de los daños
5. información acerca de las causas del daño
6. tipo de sistema estructural y configuración (11.2.3.1)

La clasificación del los daños:

- ❖ De acuerdo al modo de comportamiento que se define como el tipo de daño predominante en el elemento y depende de la resistencia relativas del elemento mecánico que actué en el.
  
- ❖ Magnitud del daño:
  - Insignificante: no afecta la capacidad estructural.
  - Ligero: las medidas que se requieren son de reparación sencillas.
  - Moderado: afecta mediana mente la capacidad estructural.
  - Severo: afecta significativamente la estructura y se requiere amplia intervención con reemplazo o refuerzo con elementos estructurales.
  - Muy grave: afecta su desempeño y es muy poco confiable, incluye el colapso total o parcial.

El calculo de la capacidad estructural se podrá realizas por medio de métodos de análisis elástico convencionales y su capacidad será la original si no se observa daño (11.2.5.4).

Se considera además para evaluar la seguridad estructural, su deformación, irregularidad, defectos y cimentación, así como la interacción con estructuras vecinas y calidad de mantenimiento. (11.2.5.5).

Cuando exista daño mayor se realizaran reparaciones de los elementos dañados y se modificara la capacidad de las estructura si así lo requiere. La evaluación podrá recomendar la demolición total o parcial del inmueble (11.2.6.2).

Las conexiones entre elementos existentes y los materiales o elementos nuevos, se deben diseñar y ejecutar de forma que alcancen un comportamiento monolítico y se asegure la transmisión de fuerzas entre ellos (11.3.2).

Es importante mencionar que el éxito de la restauración es alcanzar la capacidad original del elemento, que va a depender de la magnitud del daño y la calidad de ejecución de los trabajos de restauración (11.3.3.1).

El reemplazo de cualquier tipo de piezas, se realizara utilizando materiales del mismo tipo y con una resistencia a menos igual que la del material original (11.3.3.1).

La inyección de fluidos estará en función del ancho y tipo de grieta y puede ser a base de resinas, fluidos a base de polímeros o cementos hidráulicos. También se acepta la inserción de piezas metálicas siempre que se cuide el pandeo debido a fuerzas sísmicas (11.3.3.3).

Se deberá revisar que la modificación de los elementos sujetos a refuerzo no produzca que estos alcancen prematuramente estados límites de falla, que puedan conducir a elementos desfavorables y poco estables (11.3.4.1).

Cuando se realicen encamisados, la superficie estará limpia para que no se afecte la adherencia y se debe cuidar la compatibilidad entre las fibras y resinas empleadas, así como el cuidado de estos elementos a la intemperie.

## XII. CONCLUSIONES

Los elementos empleados para reparar grietas y fallas estructurales debidas a sismo o cualquier otro tipo de circunstancia pueden ayudar a restaurar en gran medida la resistencia estructural de la construcción. La correcta restauración de un inmueble es entonces no solo cuidar el aspecto estético si no también el estructural.

Los principales elementos que se deben considerar al restaurar una edificación, es primero identificar las causas y tratarlas, para de este modo retrasar el efecto de deterioro y el daño.

Cuando hay un trabajo estructural bien diseñado, las reparaciones a realizar se vuelven menores, a la larga una mala edificación causa mayores costos de reparación y mantenimiento, por lo que es necesario revisar siempre estructuralmente los edificios tanto viejos como nuevos. El mantenimiento de un edificio no solo debe ser entonces estético, si no que se vuelve una necesidad desde el punto de vista estructural.

La aplicación del cemento Pórtland en la restauración de edificios históricos ha originado nuevos deterioros en algunas construcciones ya que los morteros hechos con este son mucho más rígidos que los utilizados hasta antes de su aparición a principios del siglo XX. Las restituciones de aplanados realizadas con cemento Pórtland están llenas de grietas y aberturas ocasionadas por la diferencia de módulos de elasticidad de este y los

materiales originales de los monumentos históricos. Por otra parte, al inyectar o recubrir muros antiguos con mortero de cemento portland, se originan reacciones químicas con los morteros originales que generan la aparición de sales sulfatadas causantes de abolsamientos, grietas, desprendimientos e incluso la destrucción posterior de los materiales empleados. Si a esto aunamos las causas de deterioros relacionadas con acciones físicas como formación de hielo y cambios bidimensionales en la expansión térmica entre el muro de mampostería y el mortero del aplanado, tenemos que, al usar morteros impermeables, se producen separaciones de los recubrimientos por la falta de transpiración del paramento. Por lo tanto el uso de cementantes o aglutinantes ordinarios no es el indicado en la restauración de monumentos.

El uso de cementantes es un lugar común en la restauración de monumentos. Conocer la existencia de éstos y otros productos y cuáles han sido sus aplicaciones es importante para lograr cada vez mejores resultados que contribuyan al rescate de nuestro patrimonio histórico. Desde hace algunos años se viene comprobando en países industrializados que millones de viviendas antiguas, siempre que se las mantenga y restaure, pueden durar tanto o más que las construidas nuevas. Esas viviendas representan un capital considerable que se perdería totalmente en caso de demolición. Por consiguiente, una política racional de la vivienda debe introducir los problemas de la protección y la conservación de lo antiguo en la gestión global del patrimonio inmobiliario, con mayor razón si se piensa que el mejoramiento de las viviendas antiguas seguirá siendo, aún durante un tiempo razonable, el medio esencial para satisfacer las necesidades de alojamiento de los peor

dotados económicamente. En particular, la reanimación de los barrios históricos es hoy una necesidad de índole no menos económica y social que cultural.

La restauración de un inmueble muchas veces implica la sustitución de piezas y en algunas ocasiones aumentar elementos estructurales para soportar solicitaciones sísmicas, es importante entonces siempre tomar en cuenta que el hecho de aumentar más la rigidez estructural no siempre es lo correcto, lo correcto es hacer revisiones detalladas estructuralmente de acuerdo a los parámetros y conocimientos de la estructura y tomar la mejor elección para establecer un límite de seguridad adecuado.

## BIBLIOGRAFÍA



Gallo Ortiz, Gabriel O., Espino Márquez, Luis I.,  
Olvera Montes, Alfonso E. (2005) "Diseño Estructural de  
Casas Habitación", 2ª Edición, México, Mc Graw-Hill.



NTC (2004) "Normas Técnicas Complementarias Para  
Diseño Por Sismo"



NTC (2004) "Normas Técnicas Complementarias Para  
Diseño Y Construcción De Estructuras De Mampostería"



Prado Nuñez, Ricardo (2000) "Procedimientos  
de Restauración y Materiales", 1ª Edición, México, Trillas.



Loft Publications (2000) "Arquitectura Sísmica  
Prevención Y Rehabilitación", España.



Arya, Anand S. ( 2000) "Non-Engineered Construction  
In Developing Countries: An Aproach Toward Earthquake Risk  
Reduction", 12WCEE.



Rabun, J. Stanley (2000) "Structural Analysis Of Historic Building", U. S. A., John Wiley & Sons.



Ching, Francis D. K. (1998) "Diccionario Visual de Arquitectura", 2ª Edición, México, GG.



Beall, Christine (1997) "Masonry Desing And Detailing", 4ª Edición, U.S.A., Mc Graw-Hill.



Newman, Alexander, P.E.(1991), "Structural Renovation Of Buildings: Methods, Details, and Desing Examples", U. S. A., Mc Graw-Hill.



Bazán, Enrique y Meli, Roberto (1991) "Manual de Configuración y Diseño Sísmico de Edificios", 1ª Edición, México, Limusa.



Meli, Roberto (1991) "Manual de Diseño Estructural", 1ª Edición, México, Limusa.

[Http://Www.lmcyc.Com/Cyt/Octubre02/Conservar.Htm](http://Www.lmcyc.Com/Cyt/Octubre02/Conservar.Htm)

[Http://Www.Morgan.lia.Unam.Mx/Usr/Humanidades/203/Columnas/Glz.Galvan.  
Html](http://Www.Morgan.lia.Unam.Mx/Usr/Humanidades/203/Columnas/Glz.Galvan.Html)

[Http://Www.Inah.Gob.Mx/Core/Htme/Core007010402.Html](http://Www.Inah.Gob.Mx/Core/Htme/Core007010402.Html)

[Http://Www.Merida.Gob.Mx/Ayunta2002/Desurbano01/Actividades/Palacio/Cont  
enido03.Htm](http://Www.Merida.Gob.Mx/Ayunta2002/Desurbano01/Actividades/Palacio/Contenido03.Htm)

[Http://Www.Diariocambio.Com/14102002/Universidad/2carolino.Html](http://Www.Diariocambio.Com/14102002/Universidad/2carolino.Html)

[Http://Www.Uasnet.Mx/Centro/Deptos/Anuies/Confluencia/No\\_005/S\\_23.Htm](http://Www.Uasnet.Mx/Centro/Deptos/Anuies/Confluencia/No_005/S_23.Htm)

[Http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap](http://Seismo.Ethz.Ch/Gshap)