



**UNIVERSIDAD VERACRUZANA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**



**Recomendaciones para intervenir
estructuralmente edificios históricos de la
ciudad y puerto de Veracruz**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS

PRESENTA

NATALIA GARCÍA GÓMEZ

H. VERACRUZ, VER.

1999

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana



UNIVERSIDAD VERACRUZANA
INSTITUTO DE INGENIERIA

H. Veracruz, Ver., a 8 de Diciembre de 1999
DI783/99

Al Candidato al Grado
ARQ. NATALIA GARCIA GOMEZ
PRESENTE:

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso la M.I. Guadalupe Riquer Trujillo para que lo desarrolle como tesis, para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería de Estructuras

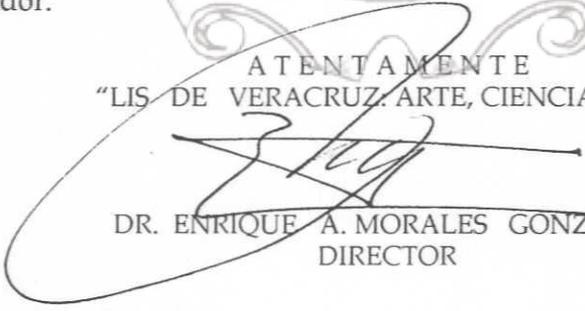
TEMA:

"RECOMENDACIONES PARA INTERVENIR ESTRUCTURALMENTE EDIFICIOS
HISTORICOS DE LA CIUDAD Y PUERTO DE VERACRUZ"

- Introducción
- Antecedentes
- I .- Características de las estructuras históricas
- II .- Centro histórico de la Ciudad de Veracruz
- III .- Intervenciones en monumentos históricos
- Conclusiones
- Bibliografía

Sin otro particular, me es grato quedar de Usted como su atento y seguro servidor.

ATENTAMENTE
"LIS DE VERACRUZ. ARTE, CIENCIA, LUZ"


DR. ENRIQUE A. MORALES GONZALEZ
DIRECTOR

EMG/apm*

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

Tesis de Maestría

Dedico este trabajo a



Dios
por estar siempre a mi lado

a mis padres
Rodrigo García Juárez y Gloria Gómez de García
por su apoyo incondicional

a mis hermanos
Gloria y Rodolfo

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

Agradezco

a mis asesores

M. I. Guadalupe Riquer Trujillo

Dr. Bonifacio C. A. Peña Pardo

M.I. Francisco Williams Linera

por sus enseñanzas, asesoramiento y su calidad como personas

a mis profesores y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana

a la Arq. Carmelina Priego Medina, a la química Teresa Zamudio y
al Dr. Sergio Alcocer
por su contribución a este trabajo

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

ÍNDICE

Introducción	1
Antecedentes	2
Capítulo I Características de las estructuras históricas	4
1.1 Aspectos generales	4
1.2 Materiales tradicionales en monumentos históricos	4
1.2.1 Ensayes en mampostería antigua	
1.3 Sistemas estructurales típicos en edificios históricos	9
1.4 Seguridad estructural de edificios históricos	12
1.4.1 Acciones y respuesta estructural	
1.4.2 Desequilibrios en elementos estructurales	
Capítulo II Centro histórico de la ciudad de Veracruz	35
2.1 Antecedentes históricos	35
2.2 Delimitación de la zona de estudio	38
2.3 Materiales y formas constructivas	41
2.4 Sistemas estructurales resistentes	46
2.5 Acciones	53
2.5.1 Sismicidad en la ciudad de Veracruz	
2.5.2 Tipo de suelo en el centro histórico de Veracruz	
2.5.3 Viento en la ciudad de Veracruz	
2.6 Estado actual e intervenciones de edificios históricos	58
Capítulo III Intervenciones en monumentos históricos	61
3.1 Aspectos fundamentales para intervenir un inmueble	61
3.2 Criterios para adecuar y reestructurar edificios históricos	63
3.2.1 Edificios irregulares en el Centro Histórico de Veracruz	
3.3 Técnicas de intervención	69
3.3.1 Cimentación	
3.3.2 Reestructuración de muros y arcos	
3.3.3 Sistemas de piso y techo	
3.3.4 Eliminación de balcones	
Conclusiones	75
Apéndices	77
Bibliografía	105

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes puntos de vista sobre los criterios que se deben aplicar para evaluar la seguridad estructural de monumentos históricos y de las técnicas para preservar su seguridad estructural. Esto se debe a la incertidumbre que se tiene sobre la validez de las técnicas modernas de análisis estructural aplicadas en este tipo de edificios, especialmente aquellas relacionadas con el diseño sísmico. Esta situación surge del frecuente mal uso que se ha dado al extrapolar procedimientos desarrollados para estructuras modernas en estructuras antiguas, sin considerar que la naturaleza de un edificio histórico debe ser diferente (17), de aquí que esto constituya un campo fértil para la investigación.

El diseño y la realización de las intervenciones en monumentos históricos deben caracterizarse por contribuciones multidisciplinarias y por acuerdos de especialistas que permitan tomar decisiones, entre otras cosas, porque los problemas en la preservación y protección de edificios y monumentos históricos surgen de la necesidad de preservar sus valores arquitectónicos y culturales, así como su seguridad estructural frente a diferentes solicitaciones. La rigidez e inadecuación de muchos de los códigos existentes, generalmente concebidos para construcciones recientes, parece algunas veces frustrar la reconciliación de estos objetivos, además de que frecuentemente las prescripciones normativas son aplicadas sin escrúpulos por quienes no poseen un adecuado conocimiento científico y cultural.

Este trabajo pretende dar algunas recomendaciones para intervenir estructuralmente edificios históricos de la ciudad de Veracruz, especialmente cuando se requiere adecuarlos a las necesidades de uso más comunes. Esto se hace mediante una aproximación al conocimiento de las propiedades mecánicas del material utilizado en el mamposteo principalmente, de los tipos de ensayos y su confiabilidad para conocer dichas propiedades, también con apoyo en las técnicas disponibles de reestructuración de Monumentos y con el estudio de las estructuras históricas de la ciudad de Veracruz, se comentan las alteraciones estructurales en dichos edificios.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

El centro de la ciudad de Veracruz cuenta con un gran número de edificaciones históricas en abandono o intervenidas estructuralmente, y debido a la falta de una normatividad para este tipo de alteraciones estructurales, éstas se han hecho generalmente de manera arbitraria, por lo que resulta una zona interesante de estudio que requiere atención y ayuda para evitar su deterioro y destrucción.

ANTECEDENTES

Para la realización de este trabajo se consultaron algunas aportaciones hechas en otras partes del mundo, por ejemplo, en Italia se han elaborado metodologías para analizar la vulnerabilidad de monumentos históricos en zonas de alto riesgo sísmico y de los criterios para mitigar dicha vulnerabilidad (10). Estos estudios forman parte de un "Código Práctico", desarrollado durante más de diez años, como una guía para el análisis y el diseño, en el que se formularon estrategias de intervención apropiadas a las técnicas constructivas originales. El propósito de esa investigación fue elaborar un manual dirigido a los profesionistas como una guía que les ayude a tener un conocimiento adecuado de las estructuras históricas de su ciudad, además de dar sugerencias sobre criterios y técnicas de intervención.

También se contó con algunos simposios y congresos internacionales de UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) e ICOMOS (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios), relacionados con la restauración de sitios y monumentos históricos, en donde se conjuntan esfuerzos y experiencias de restauradores de varias partes del mundo. Las normas y criterios que surgen de esas reuniones, referentes a la reestructuración de monumentos, son parciales, debido a que conforme se hacen estudios más profundos o más específicos, estos criterios se van modificando.

Además, se consultaron algunos lineamientos existentes en nuestro país para rehabilitar y restaurar edificios históricos de la ciudad de México, incluso en forma de normatividad, en la que describen las características de los edificios históricos de esa ciudad y proporcionan

una guía a manera de recomendaciones para realizar las intervenciones más apropiadas; debido a la falta de una reglamentación propia estas normas también se han aplicado en algunos trabajos hechos en edificios del centro histórico de Veracruz.

En nuestro país se han hecho estudios importantes para rescatar a la Catedral Metropolitana de la ciudad de México, cuyo origen de sus problemas se encuentra en los hundimientos que ha sufrido, por lo que su comportamiento estructural está estrechamente ligado a las características del suelo y de la cimentación. Para el análisis y revisión estructural se evaluaron con anterioridad las propiedades mecánicas de los materiales característicos de la mampostería mediante ensayos de compresión simple y de compresión diagonal extraídos de mamposterías similares a la de Catedral.

Además, en el análisis hecho a la estructura de la Catedral se considera que su comportamiento es elástico lineal y que existe equilibrio de fuerzas. Por las hipótesis simplificadoras para elaborar el modelo analítico, consideraron con muchas reservas los resultados numéricos. Sin embargo, estos resultados permitieron identificar las zonas más críticas y entender así cualitativamente el comportamiento de la estructura ante distintas condiciones de carga (5).

Por otra parte, también se contó con información y mapas del centro histórico de Veracruz acordes a levantamientos de las características arquitectónicas de los edificios catalogados como patrimonio histórico, realizados por el Instituto Nacional de Antropología e Historia de Veracruz (INAH-Veracruz) y por la Universidad Cristóbal Colón de la ciudad de Veracruz.

Para abundar más a esta información se hizo una recabación de datos sobre las características constructivas de las edificaciones de una zona del centro histórico, y aunque no fue posible tener acceso a todas estas construcciones por que pertenecen a particulares o están deshabitadas, si fueron las suficientes para conocer sus principales características estructurales, así como algunos de sus cambios debidos a las intervenciones más comunes.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS HISTÓRICAS

1.1 Aspectos generales

Un monumento histórico es una obra arquitectónica que requiere conservarse como testimonio de una civilización particular para las generaciones próximas. Se refiere a las obras modestas y a las grandes creaciones que con el tiempo han adquirido un significado cultural (11), por lo general se da una gran importancia a su mantenimiento, conservación y reforzamiento.

Aunque no existen soluciones únicas de análisis debido a que cada ingeniero tiene diferentes experiencias y cada uno puede asumir diferentes factores sobre la condición estructural de un monumento, en cualquier intervención se deben satisfacer principios básicos de conservación y protección de monumentos, no solo en el aspecto arquitectónico sino también en el estructural buscando lograr "mínima intervención y máxima protección" de estos edificios.

1.2 Materiales tradicionales en monumentos históricos

Los materiales estructurales más comunes, usados en la construcción de monumentos y edificios históricos son adobe, canteras, mármol, piedra en bruto, ladrillos, cal, madera y acero, algunas civilizaciones usaron el concreto pobre y los romanos inventaron el concreto "hidráulico". Estos materiales varían de acuerdo a la localidad, tiempo, composición y proceso de producción, por lo que resulta un número ilimitado de tipos que no cumplen con los estándares modernos de calidad.

Así, en el caso de una restauración particular es necesario el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales originales, como son su resistencia, módulo de elasticidad de Young (1807) y relación de Poisson (1828), necesarias para el análisis y el diseño (figura 1.2.1). La resistencia máxima del material nos indica el esfuerzo en el que ocurre la falla y ayuda a determinar la fuerza que pueden llegar a resistir los elementos de una estructura.

La madera, material de origen orgánico y muy utilizado en edificios históricos, tiene propiedades mecánicas muy variables que dependen de sus defectos (nudos, rajaduras, aserradero, etc.), es un material durable si no se encuentra expuesto a cambios de humedad y secado que la perjudique. De acuerdo al tipo de elemento trabajará a compresión, flexión o tensión, generalmente se utiliza en los sistemas de techo o entresijos y en algunos países de alto riesgo sísmico la utilizaron en los muros de sus viviendas junto con la mampostería.

El material más común en los monumentos es la mampostería y generalmente está formada por un conjunto de piedras naturales unidas por morteros débiles de cal o simplemente sobrepuestas (juntas secas). La mampostería, así como la mayoría de los materiales utilizados antiguamente, es un material frágil, más débil a la tensión que a la compresión (figura 1.2.2), las zonas de contacto entre las piezas son planos de debilidad para transmitir esfuerzos de tensión y de cortante. El comportamiento de la mampostería deja de ser lineal para niveles elevados de esfuerzos, la aplicación de cargas que permanezcan por largo tiempo provoca el fenómeno de flujo plástico que ocasiona pérdida de rigidez y se presenta una redistribución de esfuerzos.

El refuerzo en materiales pétreos permite eliminar la principal limitación estructural de la mampostería, es decir, su baja resistencia a esfuerzos de tensión, por ejemplo, colocando barras de acero integradas a la mampostería en las zonas y en la dirección en que pueden aparecer tensiones. El estudio de las propiedades mecánicas de la mampostería resulta una tarea difícil que incluye muchas incertidumbres, como las mencionadas a continuación:

- 1) Hay dificultades en extraer especímenes satisfactorios para ensayos, es casi imposible aplicar estándares modernos sin modificaciones radicales.
- 2) Hay poca homogeneidad y uniformidad comparándola con las construcciones modernas, tanto, que los esfuerzos en todas direcciones serán menos predecibles relacionándolos con los esfuerzos unitarios de los materiales constituyentes.
- 3) Existen variaciones importantes en las propiedades de los materiales que constituyen la mampostería.

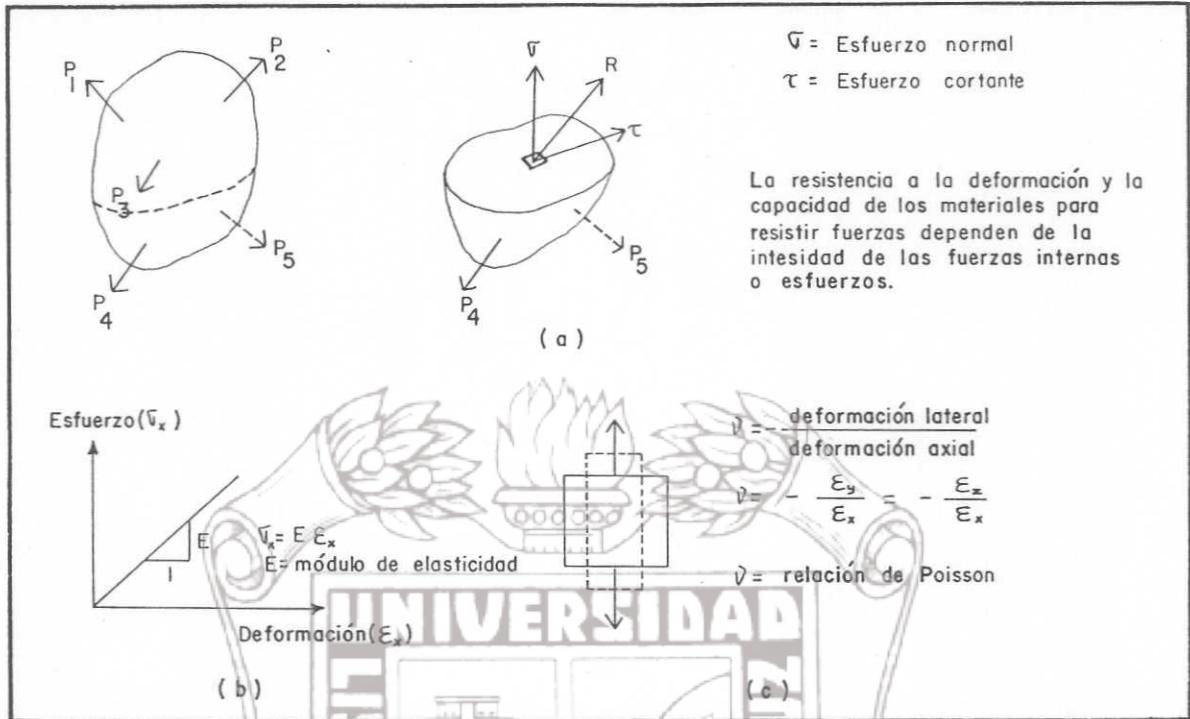


Figura 1.2.1 (a) Componentes de fuerza perpendicular (σ) y paralela (τ) al plano de la sección de un cuerpo sometido a fuerzas, (b) módulo de elasticidad de un material, (c) razón de la deformación lineal en dirección lateral con la deformación lineal en dirección axial.

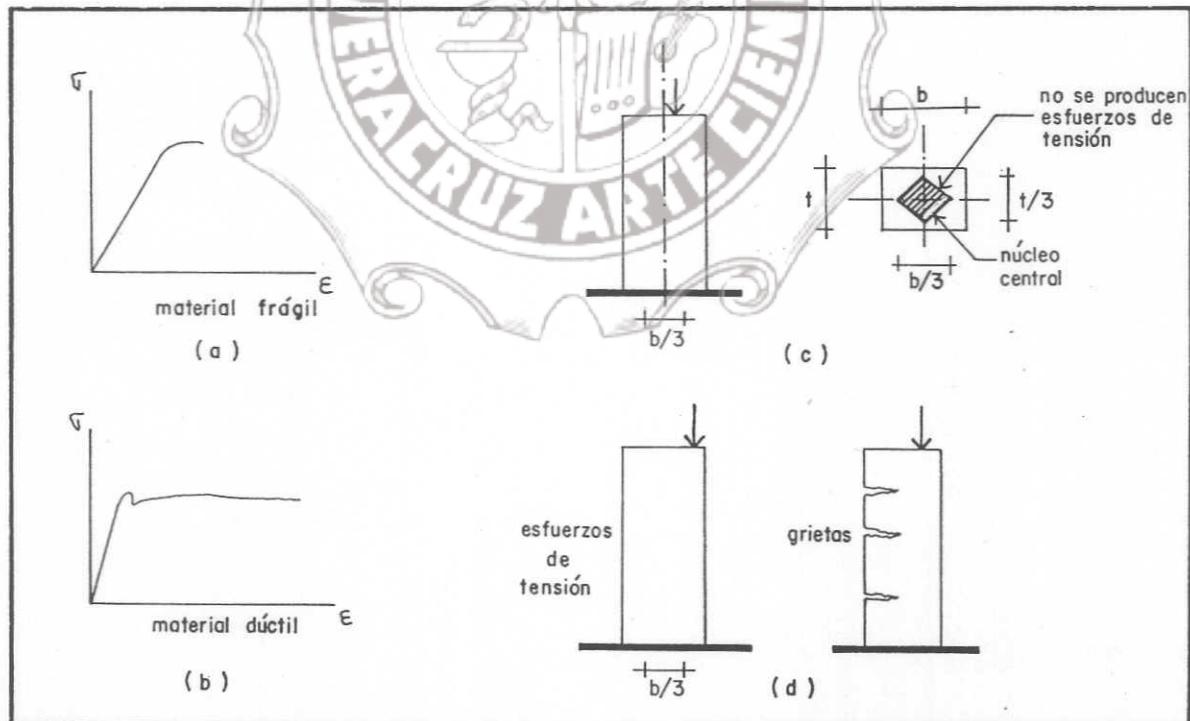


Figura 1.2.2 (a) y (b) Gráficas esfuerzo-deformación de materiales frágiles y dúctiles. (c) Elevación y sección transversal de un muro que muestra el área central en la que la fuerza resultante no produce esfuerzos de tensión. (d) Muros en los que la fuerza vertical está fuera del área central causando esfuerzos de tensión o grietas.

El procedimiento usual para obtener estos valores ha sido el uso de varias fórmulas empíricas donde se interrelaciona la geometría de la mampostería con las unidades de resistencia de los materiales constituyentes, piezas y mortero (23), las cuales se han utilizado frecuentemente tanto en la práctica como en el diseño y análisis de estructuras de mampostería. La mampostería, sin embargo, es un material compuesto cuya respuesta mecánica ante cargas es altamente compleja (figura 1.2.3), la complejidad del problema abarca geometrías arbitrarias y condiciones de carga que ahora pueden resolverse con técnicas numéricas gracias al avance de los sistemas de cómputo, que aunados con las técnicas experimentales ayudan a profundizar en la inspección de cada tipo de construcción y realizar simulaciones lo más próximas a la realidad. Estas simulaciones ayudan a calcular y experimentar las características de rigidez y los movimientos mecánicos, así como los efectos de una posible intervención, de sismos o de cambios climáticos.

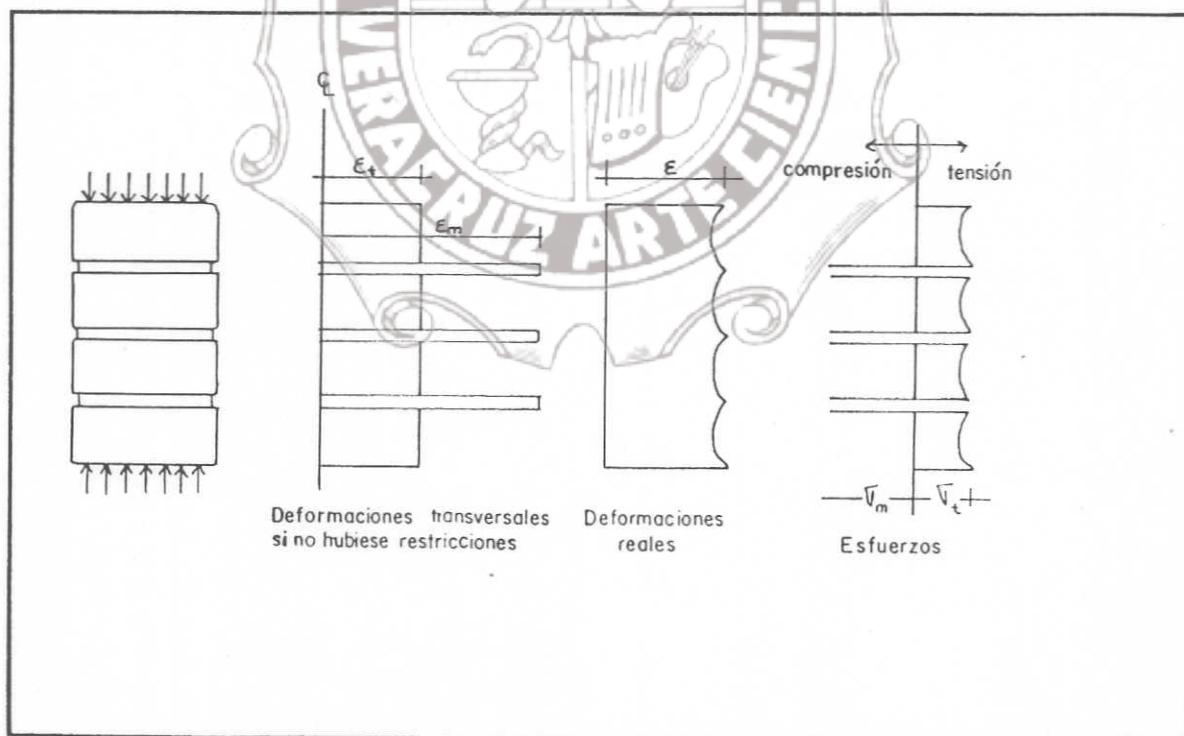


Figura 1.2.3 Idealización de la interacción entre mortero y pieza. El mortero es más deformable que la pieza.

Algunos países europeos como Bélgica, Italia y los que conforman el Reino Unido, entre otros, están realizando estudios para conocer las propiedades mecánicas de sus mamposterías y están desarrollando bancos de datos y modelos computacionales para predecir las características mecánicas de los elementos estructurales de mampostería, con el fin de establecer códigos y estándares nacionales y europeos, tanto para el diseño de nuevas estructuras como para la evaluación de las ya existentes.

El uso de procedimientos de identificación de parámetros en estructuras lineales o no lineales está, hoy en uso constante gracias a la mejora de los instrumentos de medición y de los equipos de cómputo donde se pueden hacer los cálculos que se requieren. Es importante instrumentar los edificios que, por su importancia lo requieran para así conocer su degradación con eventos sísmicos consecutivos (21).

1.2.1 Ensayes en mampostería antigua

Como se dijo anteriormente, para definir el comportamiento de la mampostería ante distintas solicitaciones es necesario realizarle ensayos con el fin de determinar sus propiedades mecánicas básicas. Existen ensayos destructivos y no destructivos de acuerdo al tipo de intervención hecha a la mampostería; el procedimiento de extracción de especímenes es demasiado destructivo, por lo que no es permitido para un monumento. Los métodos parcialmente destructivos o el uso de microelementos de morteros y ladrillos son más prometedores para determinar las fallas y las leyes constitutivas de las mamposterías originales.

Para pruebas destructivas de compresión se han propuesto especímenes cúbicos o pilas de diferentes esbelteces, los cubos son preferibles en el caso de muros gruesos, como los de edificios antiguos. Con el ensayo de compresión se deducen las propiedades que se relacionan con el comportamiento de muros ante cargas verticales, para conocer su comportamiento ante cargas laterales se realizan pruebas en muretes sometidos a cortante y a compresión diagonal.

Existen técnicas para evaluar la mampostería en el sitio consideradas como semidestructivas debido a que minimizan el daño a la mampostería existente, por lo que son aceptables para conocer las propiedades mecánicas en monumentos históricos. Con estas técnicas se pueden hacer ensayos de esfuerzos o de deformación en el sitio mediante el uso de gatos planos e instrumentos de medición para obtener una estimación del comportamiento a compresión o de la resistencia al cortante de la mampostería, propiedades importantes para determinar su resistencia ante acciones verticales y horizontales (sísmicas y de viento). En el apéndice D se presenta con mayor detalle el desarrollo de estos ensayos y su importancia de aplicarlos en edificios antiguos.

Existen técnicas para conocer la constitución interna de la mampostería, como el ultrasonido o los equipos de transmisión de energía, útiles para evaluar la integridad estructural de grandes bloques de piedra, sus planos de falla y zonas débiles, también sirven para verificar la profundidad de grietas que se ven en la superficie, identificar daños por fuego, la efectividad de una consolidación o reparación de muros y para revisar la unión entre piedras individuales en una columna.

1.3 Sistemas estructurales típicos de los edificios históricos

Los edificios históricos pueden clasificarse en dos categorías principales desde el punto de vista estructural:

- a) estructuras articuladas (por ejemplo los templos clásicos)
- b) edificios de mampostería

Los elementos de soporte verticales generalmente son muros, columnas y pilastras (columnas adosadas a los muros); las cubiertas pueden ser de superficie curva (cúpulas, bóvedas de cañón y semiesféricas), armaduras de madera o sistemas de piso y techo planos. Los primeros dos tipos de cubiertas se utilizaron en construcciones religiosas, mientras que el último tipo fue común en viviendas.

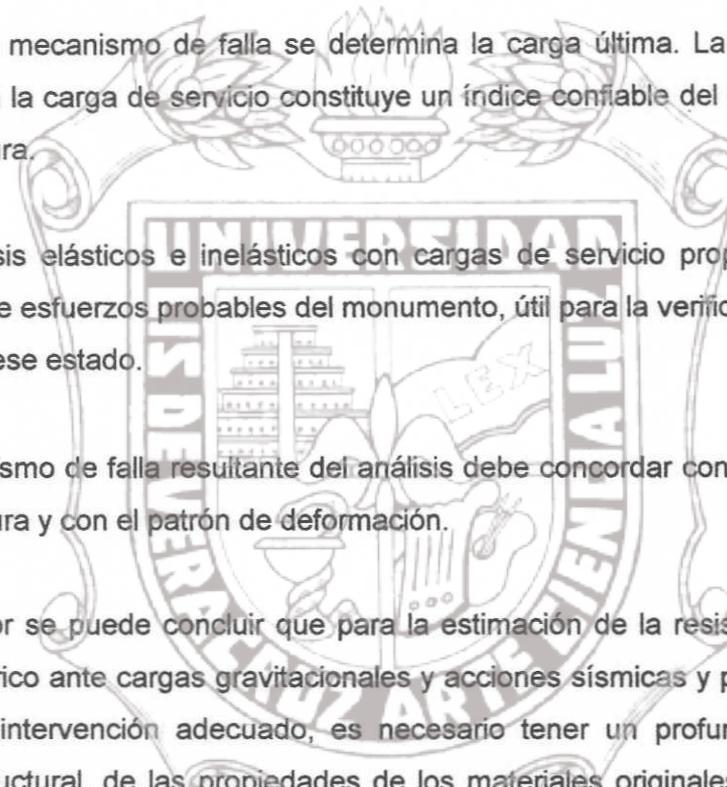
El sistema estructural de un edificio histórico transmite los esfuerzos de compresión generados por su peso propio y por la descarga de la estructura a las columnas, muros y/o contrafuertes. Generalmente se ve afectado por problemas de estabilidad debido al deterioro de sus elementos estructurales por:

- a) falta de mantenimiento
- b) intemperismo
- c) solicitaciones sísmicas
- d) hundimientos del terreno
- e) intervenciones inadecuadas

Los edificios históricos de mampostería son los más comunes, este material es heterogéneo y tiene variaciones importantes de sus cualidades en diferentes miembros estructurales e incluso en el interior de un mismo miembro (17), por lo que pueden existir variaciones importantes en la rigidez y resistencia de las distintas partes de la estructura. Las propiedades estructurales de la mampostería en general tienen dispersiones elevadas debido al poco control que se puede ejercer sobre las características de los materiales constitutivos y sobre el proceso de construcción que generalmente es artesanal.

El mejor aprovechamiento de la mampostería para fines estructurales se tiene en elementos masivos que estén sometidos esencialmente a esfuerzos de compresión. Aún cuando los constructores de la antigüedad no lo sabían, en algunos de sus edificios utilizaron muros de mampostería que sirvieron para resistir fuerzas horizontales; como el caso del Partenón en Atenas, del que se hablará más adelante (figura 1.4.1).

En la restauración de un monumento es importante preservar su sistema estructural debido a que no existe mejor prueba de su eficiencia que la supervivencia que ha tenido a través de varios siglos a fuertes sismos. Para preservar dicho sistema estructural se recomienda realizar análisis estáticos y dinámicos cuando el edificio presenta fallas detectables como grietas, desplomes o asentamientos de cimentación. Para el análisis estructural de un monumento los siguientes aspectos son de utilidad:

- 
- a) Una estructura de mampostería que está sujeta a tensiones importantes puede presentar agrietamientos que afecten la estabilidad de sus elementos, de manera que la distribución de esfuerzos se altera con respecto a la que se determina con análisis elástico lineales. Por lo que el mecanismo de falla se determina mediante métodos numéricos como el método paso a paso, aplicando los teoremas de plasticidad.
- b) Para este mecanismo de falla se determina la carga última. La razón entre la carga última con la carga de servicio constituye un índice confiable del nivel de seguridad en la estructura.
- c) Los análisis elásticos e inelásticos con cargas de servicio proporcionan uno de los estados de esfuerzos probables del monumento, útil para la verificación del patrón de la grieta en ese estado.
- d) El mecanismo de falla resultante del análisis debe concordar con la grieta existente en la estructura y con el patrón de deformación.

De lo anterior se puede concluir que para la estimación de la resistencia residual de un edificio histórico ante cargas gravitacionales y acciones sísmicas y para la elaboración de un plan de intervención adecuado, es necesario tener un profundo conocimiento del sistema estructural, de las propiedades de los materiales originales, de los patrones de grietas, deformaciones y sus cambios en el tiempo, de la respuesta estructural a las cargas gravitacionales y sísmicas, así como del riesgo sísmico de la región (23).

El conocimiento sobre el comportamiento de grandes estructuras de mampostería con un análisis racional y un diseño aproximado debe basarse en principios mecánicos, y no es muy recomendable tomar criterios empíricos que han sido desarrollados en el pasado y que a menudo son aplicables únicamente para casos específicos que se han investigado. El primer estudio riguroso de la mampostería fue desarrollado por Coulomb (1776), quien por el cálculo de la capacidad de arcos desarrolló conceptos y métodos que dos siglos después formaron la base del análisis al límite del que se hablará en el siguiente capítulo.

1.4 Seguridad estructural de edificios históricos

Las estructuras antiguas se realizaron de acuerdo a la experiencia que habían tenido sus constructores con trabajos anteriores y en su intuición basada en la observación de la naturaleza. Los edificios se realizaron con base al método de prueba y error, así establecieron las reglas y costumbres en sus construcciones. Varios siglos después se usó el esquema de diseño elástico, en el que se limitan los esfuerzos de trabajo a valores menores que ciertos valores admisibles. Sólo hasta hace algunas décadas se comenzó a usar el diseño por resistencia última en la mampostería, en donde se pretende aprovechar la resistencia de los materiales y establecer factores de seguridad conocidos por varios estados límite de la utilidad de la estructura.

Análisis elástico

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_t = \text{esfuerzos de trabajo} \\ \sigma_t \leq \sigma_p \\ \sigma_p = \text{esfuerzos máximos} \end{array} \right\}$$

Análisis por resistencia última

$$\left. \begin{array}{l} \lambda P_t = \text{carga de trabajo} \\ \lambda P_t \leq P_U \\ \lambda = \text{factor de carga} \\ P_U = \text{carga máxima} \end{array} \right\}$$

La función de una estructura es absorber las sollicitaciones que se derivan del funcionamiento de la construcción, así la seguridad estructural consiste en proporcionar la seguridad adecuada ante la aparición de estados límite de falla para las acciones más desfavorables que puedan presentarse durante la vida útil de la construcción y procurar que en las condiciones normales de operación no se sobrepasen los estados límite de servicio.

En algunas normatividades existentes, las dimensiones de los elementos estructurales de mampostería se determinan mediante reglas empíricas, de manera que los materiales

presenten ciertas resistencias mínimas a la compresión para que sea aceptado su uso y se establecen grosores mínimos de los muros para ciertas alturas y longitudes. No toman en cuenta fuerzas horizontales ni variaciones de tensión por excentricidad de la carga, ni la heterogeneidad de los materiales. Así, para poder prescindir de tal complejidad, las reglas conducen en ciertos casos a grosores excesivos.

Es necesario contar con una aproximación racional del comportamiento de la mampostería y gracias al importante avance de los métodos numéricos y sus aplicaciones a problemas de ingeniería mediante el uso de métodos computacionales se han logrado obtener buenos resultados. Uno de estos métodos es el de elemento finito (MEF), con el que se pueden obtener las sollicitaciones en modelos muy refinados de estructuras complejas, por lo que son de mucha utilidad en construcciones de mampostería.

Cualquier cuerpo sólido hecho de un material homogéneo y con una geometría arbitraria sujeta a cargas específicas como cargas concentradas, distribuidas, gravitacionales o térmicas, pueden ser analizadas usando procedimientos del MEF. La no homogeneidad se puede incluir discretizando el cuerpo de tal manera que se tome más de un material. En el análisis del MEF se discretiza cada pieza y cada junta del mortero, y es necesaria la ley constitutiva de las unidades y del mortero. Sin embargo, si se restringe el número de elementos, entonces será necesaria la ley constitutiva de la mampostería. El modelo constitutivo de la mampostería tiene que ser validado y verificado a través de monitoreos cuidadosos de experimentos físicos.

1.4.1 Acciones y respuesta estructural

Acciones

Las acciones son factores que producen fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones en una estructura; de acuerdo a la duración con que se presentan pueden clasificarse en:

a) Acciones permanentes

Estas acciones, como su nombre lo indica, actúan en la estructura de manera continua, con el tiempo prácticamente no varían, como la carga muerta, el empuje de líquidos o tierra y desplazamientos o deformaciones debidas a movimientos diferenciales o preesfuerzos.

Antes del siglo XIX la mayoría de las estructuras se construían en forma masiva y principalmente resistían su propio peso por lo que en las estructuras históricas tiene gran importancia su peso propio en relación con las demás cargas. Para las normas modernas estas estructuras resultan extremadamente masivas y pesadas debido a que los materiales usados eran débiles y no existía el análisis estructural. Por ejemplo, las viviendas antiguas tienen sus elementos estructurales de grandes dimensiones, con muros y entresijos de espesores considerables, por lo que resultan estructuras con carga muerta importante.

b) Acciones variables

Son acciones que varían con el tiempo de manera considerable, ejemplos de estas acciones son las cargas vivas, los efectos de la temperatura, los hundimientos diferenciales o los efectos debidos a maquinaria.

Es importante señalar que es práctica común el cambio de uso de un inmueble antiguo, con lo que se hace variar sus cargas vivas y esto en muchos casos resulta peligroso, especialmente cuando sus plantas altas sirven de bodegas, o se almacena algún tipo de maquinaria. También se pueden encontrar edificios antiguos que en otro tiempo fueron viviendas y que actualmente sirven de escuelas, por ejemplo, lo que hace variar de manera considerable el número de personas que habitan el inmueble.

c) Acciones accidentales

Son factores externos que afectan a la construcción y que no forman parte de su funcionamiento normal, como los sismos, el efecto del viento, de las lluvias, explosiones, etc.

Las condiciones atmosféricas pueden afectar algunos materiales estructurales en edificios antiguos, más aún si la estructura ha tenido un mantenimiento deficiente. Los elementos estructurales de madera que se han humedecido por condensación o filtraciones de agua pierden resistencia y pueden colapsar, razón por la que muchos edificios restaurados transforman su sistema de entrepiso.

Generalmente los monumentos históricos han sobrevivido a fuertes sismos gracias al uso de formas simples que reducen las cargas sísmicas y al empleo de materiales compresivos que reducen de manera importante las fuerzas de tensión y cortantes. A continuación se presentan algunos ejemplos de monumentos (3) que han resistido movimientos telúricos importantes y de cómo han trabajado sus elementos (figura 1.4.1):

Aunque está en una zona sísmica, el Partenón de Atenas (447 a. C.) ha permanecido durante 24 siglos gracias a la buena ubicación de sus elementos resistentes, a la simetría de su planta en ambos ejes y a sus muros que actúan como muros de "cortante". A lo largo de sus costados, piezas de mármol y uniones de hierro conectan el espacio entre la columnata y la pared; durante un sismo la columnata se comporta como un todo con las paredes de la nave gracias a la similitud de sus masas. A lo largo de sus costados cortos, las vigas y planchas de mármol que cubren el espacio entre las columnas y la pared, las conectan a una distancia fijada sólo por medio de la fricción, no existen elementos de unión, permitiendo su movimiento independiente ya que la masa y la geometría de la columnata en esta zona es diferente a la de la pared (foto y figura 1.4.1).

Los griegos lograron una mayor cooperación entre las piezas de los muros mediante conectores especiales y/o morteros de alta calidad. Colocaron refuerzos de madera horizontales y a veces también verticales en la mampostería, mejorando su flexibilidad y capacidad para soportar fuerzas de tensión (figura 1.4.10c). En esos pueblos se utilizaron pisos o techos conectados a los muros como una técnica antisísmica (figura 1.4.10d).

Otro ejemplo importante es el Panteón romano (27 a. C.) que cuenta también con una sencilla distribución de sus elementos, con muros muy gruesos y de gran peso que

resisten los empujes de la cúpula de mayor claro (43.6 metros) que se realizó en la antigüedad. La fuerza vertical de gravedad de la masa del Panteón es tan grande, comparándola con cualquier fuerza horizontal, que toda la estructura trabaja siempre a compresión. Esta es una forma sencilla del preesfuerzo actual, donde se inducen fuerzas de gran compresión para reducir las fuerzas de tensión en vigas. Sus muros de mampostería pueden soportar esfuerzos de cortante muy pequeños, pero su espesor suple las deficiencias del material (foto 1.4.2 y figura 1.4.1).

La iglesia de Sta. Sofía en Estambul (537 d. C.) fue diseñada para resistir las fuerzas horizontales de las cúpulas y continuarias a los arcos, no tomaron en cuenta las acciones sísmicas, sin embargo, esta construcción ha soportado una gran actividad sísmica, gracias a su sencillez, simetría y a una adecuada distribución de su masa. La estructura ha sufrido colapso parcial por tamaños inadecuados de los miembros, por las propiedades de los materiales y por conexiones deficientes (foto 1.4.3).

Los edificios góticos son muy altos, las torres de algunos de ellos pasan los 150 metros de altura, por lo que sus constructores disminuyeron la masa empleada modelando sus elementos estructurales más eficientemente. Los muros se hicieron más ligeros girándolos en ángulo recto para formar contrafuertes, así fueron capaces de responder a las fuerzas horizontales como el viento, los sismos y empujes de arco (figura 1.4.1 y fotos 1.4.4-1.4.6).

Por lo general, los monumentos históricos cumplen con algunas condiciones de regularidad (apéndice A) indispensables para el buen comportamiento sísmico de una estructura, son edificios que presentan cierta simetría en la distribución de sus elementos resistentes, no tienen formas complejas, ni muy alargadas y esbeltas, no cuentan con entrantes y salientes muy acentuadas, tampoco presentan variaciones bruscas de resistencia y rigidez (figuras 1.4.2 y 1.4.3). Los principales problemas sísmicos se derivan de una mala configuración de la estructura del edificio, que puede generarse cuando se realizan reparaciones o cambios estructurales considerando únicamente las cargas gravitacionales y no las acciones horizontales.

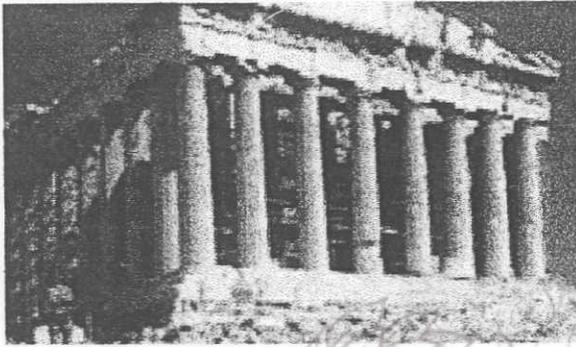


Foto 1.4.1 Partenón de Atenas.

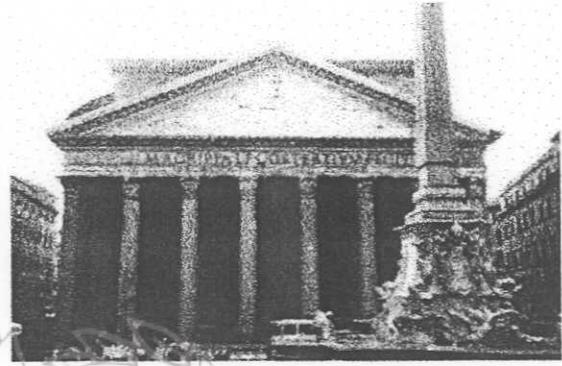


Foto 1.4.2 Panteón Romano.

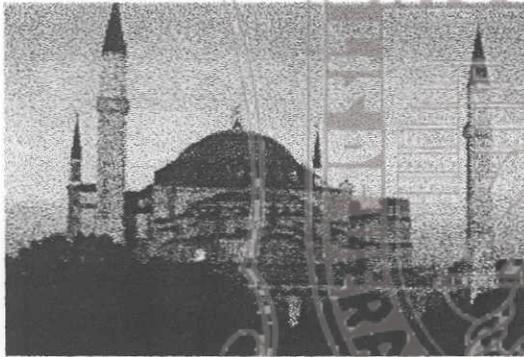


Foto 1.4.3 Iglesia de Sta. Sofía (Estambul).



Foto 1.4.4 Catedral de Colonia (Alemania)
Altura de las torres: 157.38m.

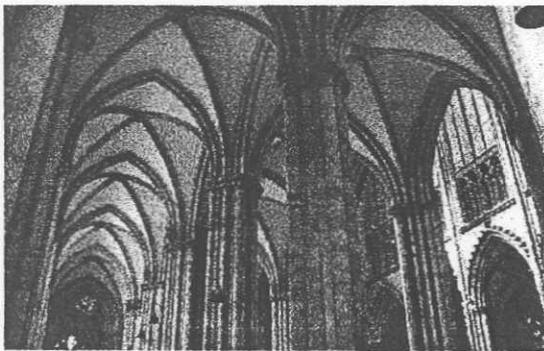
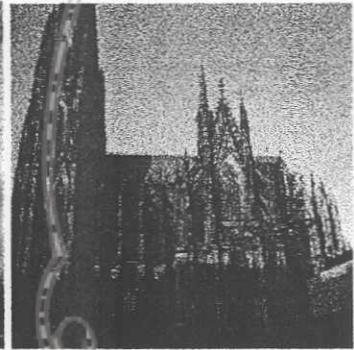


Foto 1.4.5 Interior de la Catedral de Colonia.

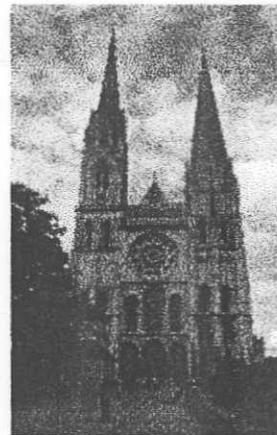


Foto 1.4.6 Catedral de Chantres (Francia)
Altura de sus torres: 115m.

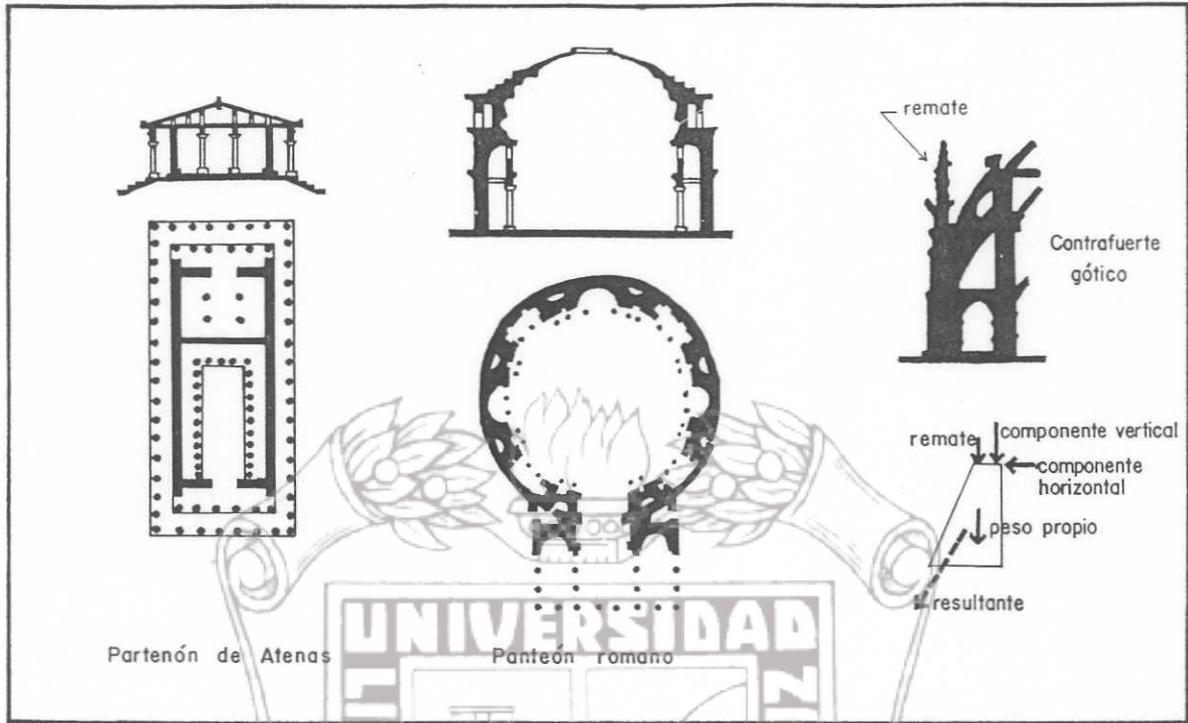


Figura 1.4.1 Planta y elevación de monumentos históricos.

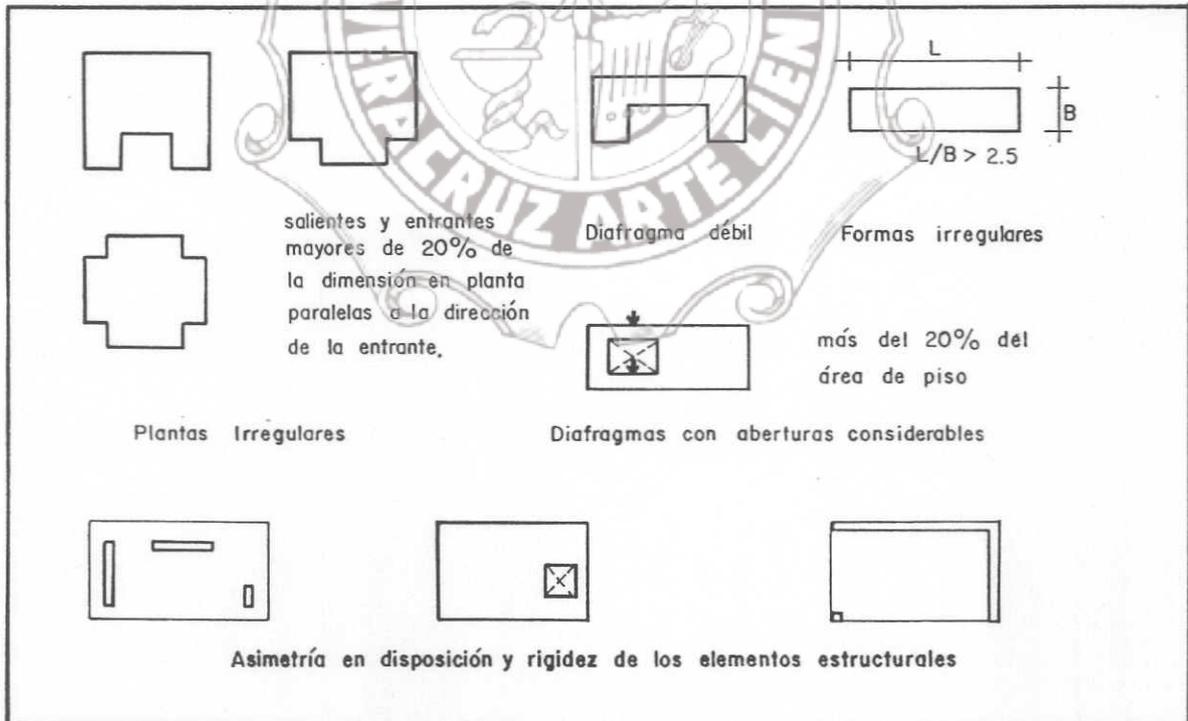


Figura 1.4.2 Irregularidades en planta.

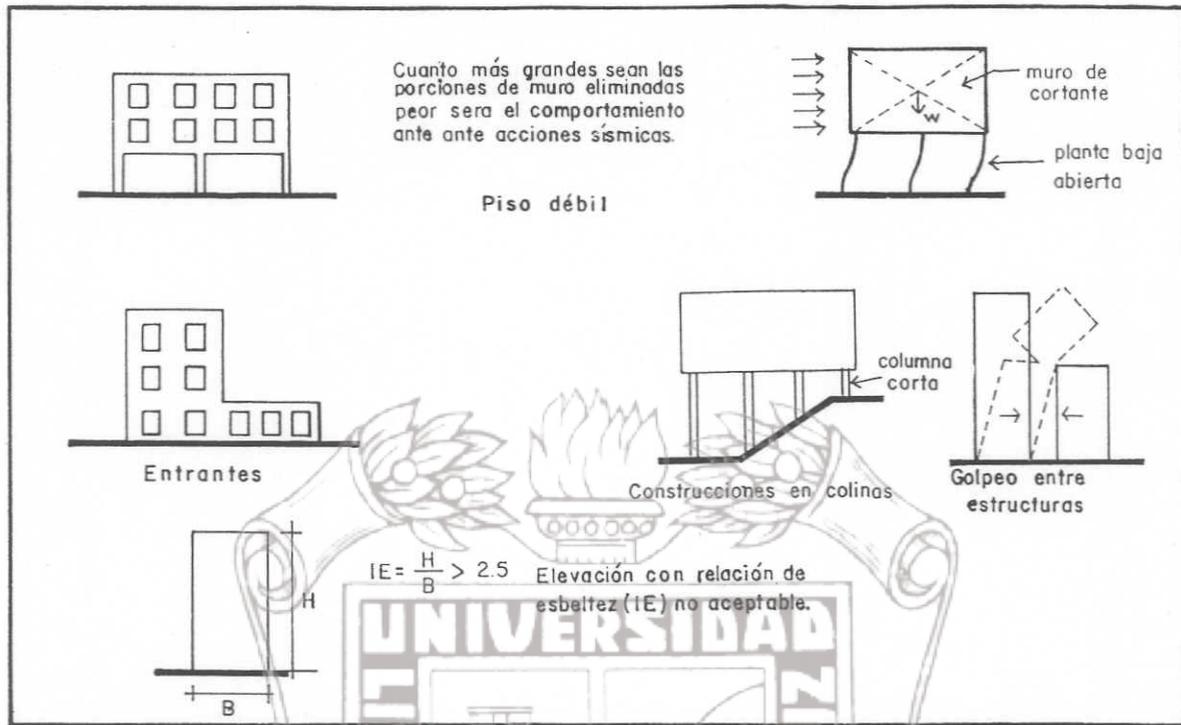


Figura 1.4.3 Irregularidades en elevación

Un movimiento sísmico daña a un edificio debido a las "fuerzas de inercia" que se generan internamente a causa de la vibración de la masa del edificio, por lo que estas fuerzas dependen de la masa, tamaño y forma de la construcción, el aumento de la masa produce un aumento en la fuerza (figura 1.4.4).

El movimiento de un edificio se caracteriza por su período, que depende de la rigidez y la masa de la estructura. Una estructura puede tener más de un período, pero el primer modo generalmente es el predominante desde el punto de vista estructural (figura 1.4.5). Las estructuras pueden ser flexibles y de período largo o rígidas y de período corto, debe procurarse que el período de la estructura no se acerque al del suelo con el fin de evitar que el edificio entre en resonancia con el terreno.

Las estructuras históricas, por ser masivas, generalmente tienen un período pequeño. Si el suelo sobre el que están cimentadas es flexible, no entran en resonancia y los daños

ante un sismo no son significativos, como ha sucedido en los monumentos de la ciudad de México. En cambio, en regiones cercanas a los epicentros como Chiapas, Oaxaca, Michoacán, Guerrero y Colima, los monumentos pueden entrar en resonancia con el terreno, ya que su período se aproxima al del suelo y pueden tener daños graves, incluso el colapso (26).

Generalmente, los problemas sísmicos en monumentos históricos surgen de las características intrínsecas de las mampostería: su gran peso y su baja resistencia a la tensión, agravada por el intemperismo. Otro aspecto crítico es la dificultad de dar continuidad a sus miembros estructurales, así como la dificultad de contar con diafragmas rígidos horizontales capaces de distribuir las fuerzas de inercia a los muros que son mucho más rígidos y fuertes, de esto se hablará más adelante.

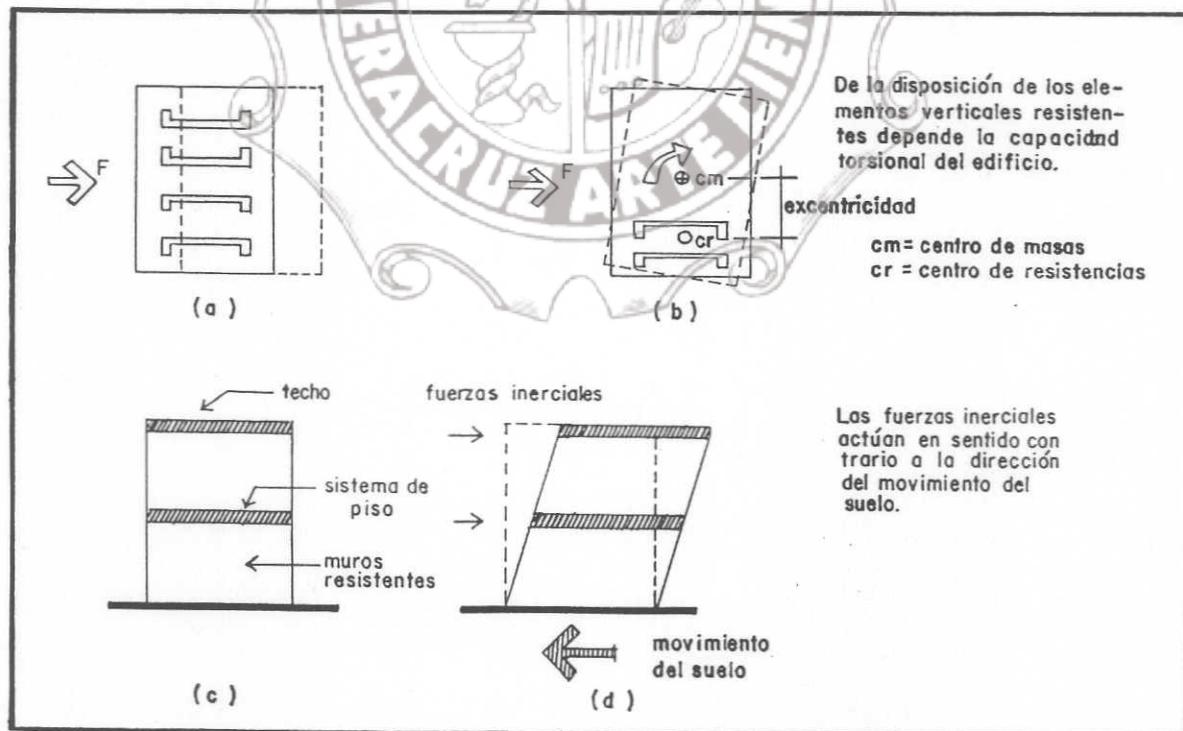


Figura 1.4.4 Planta de un edificio bajo fuerzas laterales (a) sólo con desplazamiento lateral y (b) con torsión. Elevación de una construcción de mampostería y sus fuerzas inerciales.

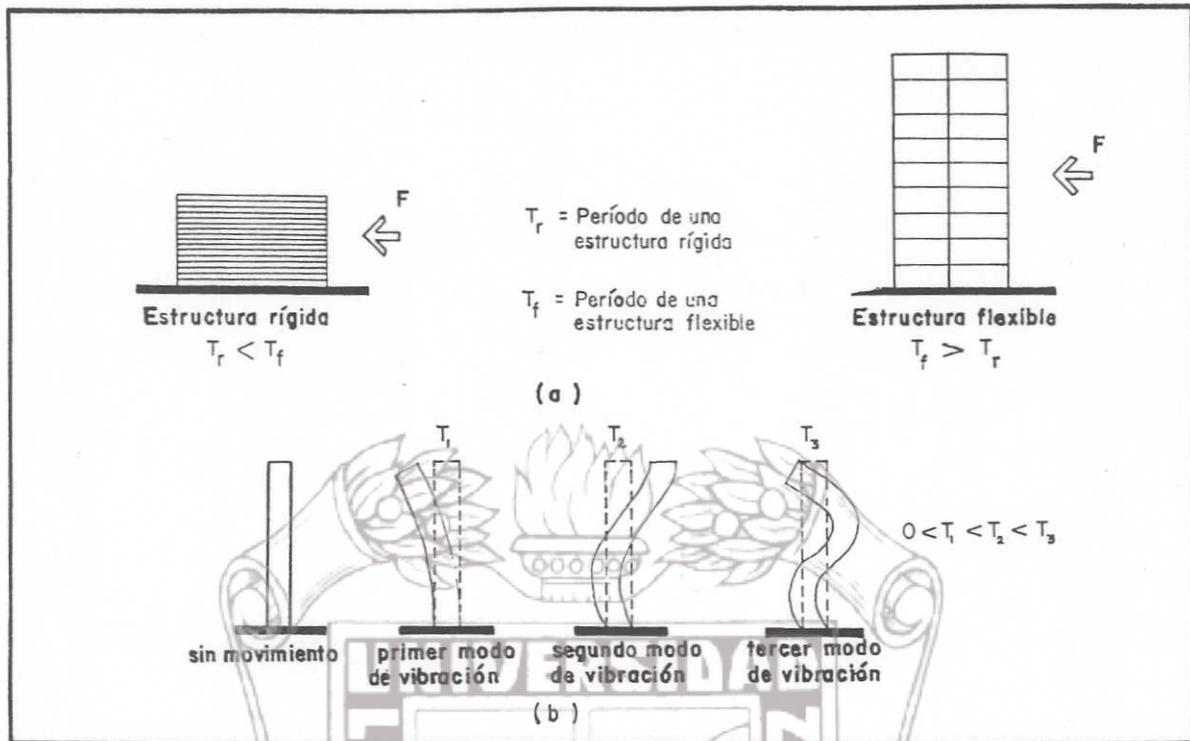


Figura 1.4.5 (a) La flexibilidad y rigidez de una estructura determinan el comportamiento del edificio bajo movimientos sísmicos. (b) Periodos de vibración fundamentales de una estructura.

Otra acción accidental que puede dañar las estructuras históricas es el viento, especialmente cuando se encuentran muy deterioradas y las rachas del viento son considerablemente fuertes. Puede ocasionar problemas en edificios con muros que no cuentan con buenas conexiones a los entrepisos y techos o que carecen de ellos, debido a que los muros trabajan como elementos en voladizo de gran peso y con esbeltez considerable.

Respuesta

La respuesta de una estructura es el conjunto de parámetros físicos como desplazamientos lineales y angulares, esfuerzos y deformaciones que originan agrietamientos, entre otros; los cuales describen el comportamiento de la estructura ante las acciones que le son aplicadas. La respuesta depende en gran medida de la resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura, además de su configuración, como se comentó en párrafos anteriores.

Una medida de la rigidez es la deflexión que depende de la geometría del elemento y de las características del material, es importante evitar una deflexión excesiva. La resistencia consiste en que una estructura o un elemento de ella soporte una carga sin exceder cierto esfuerzo, generalmente se determina mediante procedimientos analíticos que requieren las propiedades mecánicas del material. El planteamiento de los estados límite consiste en el cálculo de la resistencia mediante la determinación de la fuerza interna que produce algún estado límite.

Estados límite

Es cualquier etapa del comportamiento de una estructura a partir de la cual su respuesta se considera aceptable. El diseño por estados límite pretende asegurar que exista una probabilidad adecuada de que el estado límite no sea alcanzado. Son dos tipos:

- 1) Estado límite de falla: se presenta cuando la estructura sufre una falla total o parcial y tiene daños que afectan su capacidad para resistir nuevas acciones. La falla de una sección puede ser por cortante, flexión, torsión o cualquier combinación de sus efectos.
- 2) Estado límite de servicio: se presenta cuando se afecta el buen funcionamiento de la construcción, aunque la seguridad de la estructura no se altere; algunos ejemplos son los agrietamientos, vibraciones excesivas y daños a elementos secundarios como ventanas o muros divisorios.

1.4.2 Desequilibrios en elementos estructurales

1.4.2.1 Cimentación

En los edificios coloniales de nuestro país se emplearon cimientos de mampostería en construcciones livianas, generalmente eran paramentos verticales pocas veces escalonados o piramidales. Se utilizaron emparrillados de madera de cedro en edificios de peso intermedio, equivalente a las losas de cimentación; para construcciones más

pesadas emplearon pilotes bajo el emparillado. También usaron fierro a manera de emparillado de rieles, a veces sobre cimientos de piedra que servían de cadenas de repartición (figura 1.4.6).

Cuando ceden los cimientos, las grietas generalmente aparecen alrededor de puertas y ventanas diagonalmente a la dirección del movimiento (figura 1.4.7). Estos asentamientos pueden deberse a la construcción de edificios adyacentes, fallas del subsuelo, sobrecargas, heterogeneidad de la resistencia del subsuelo o ampliaciones.

1.4.2.2 Muros

Los muros de mampostería están sujetos a cargas verticales, fuerzas laterales y momentos de volteo, así como empujes normales al plano de los muros. Pueden presentarse fallas cuando la capacidad de la estructura excede los efectos o sus combinaciones de las cargas anteriores, estas fallas pueden ser por carga axial, por flexión o por cortante.

Debido al gran espesor de los muros en edificios históricos, las cargas gravitacionales se transmiten prácticamente de manera axial, por lo que no tienen problemas de pandeo. Ante cargas gravitacionales los muros de edificios históricos pueden llegar a agrietarse verticalmente, por lo general debido a una mala estructuración. Estos agrietamientos se presentan por la concentración de esfuerzos cuando la carga se transmite a los muros por apoyos aislados (figura 1.4.8a).

Cuando existen cargas laterales en el plano del muro, se presentan grietas diagonales si los esfuerzos cortantes superan la resistencia de la mampostería (figura 1.4.8b), el muro puede dañarse aún más si hay vanos debido a que se reduce su resistencia y se generan concentraciones de esfuerzos. La falla cortante en edificios históricos es comúnmente asociada a muros con grandes aberturas como las torres de campanarios, que tienden a volcarse siendo la falla por cortante la causa más común de colapso.

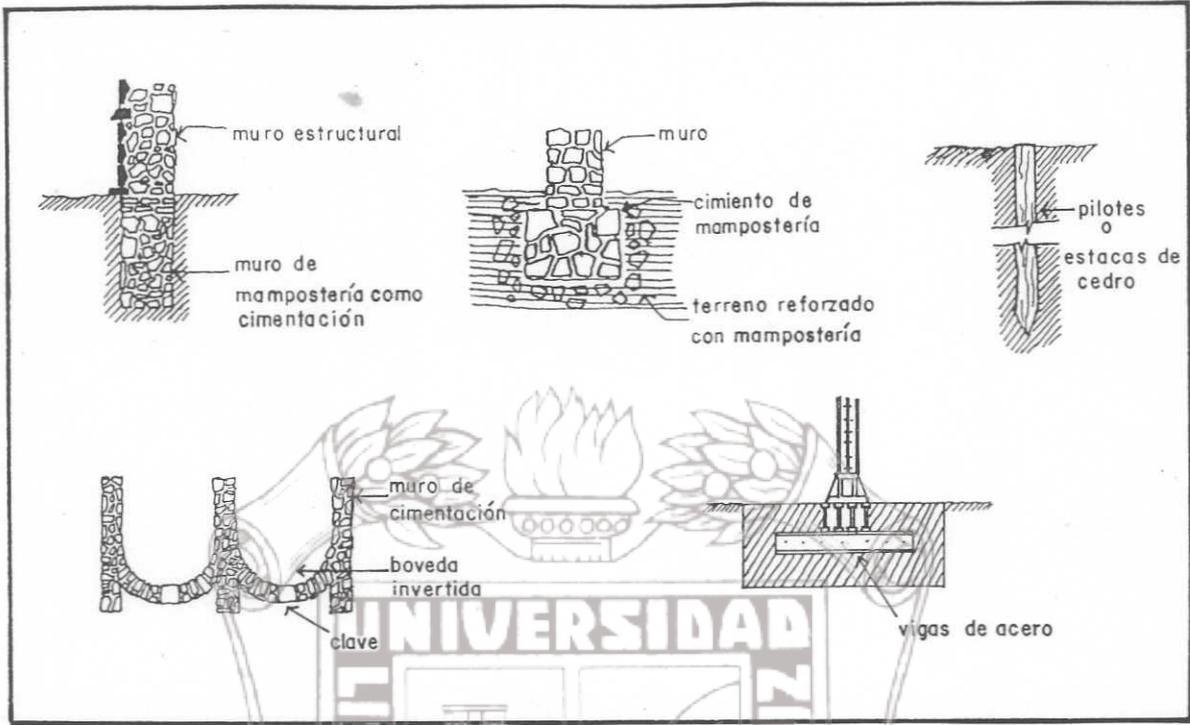


Figura 1.4.6 Cimentaciones de diferentes edificios históricos.

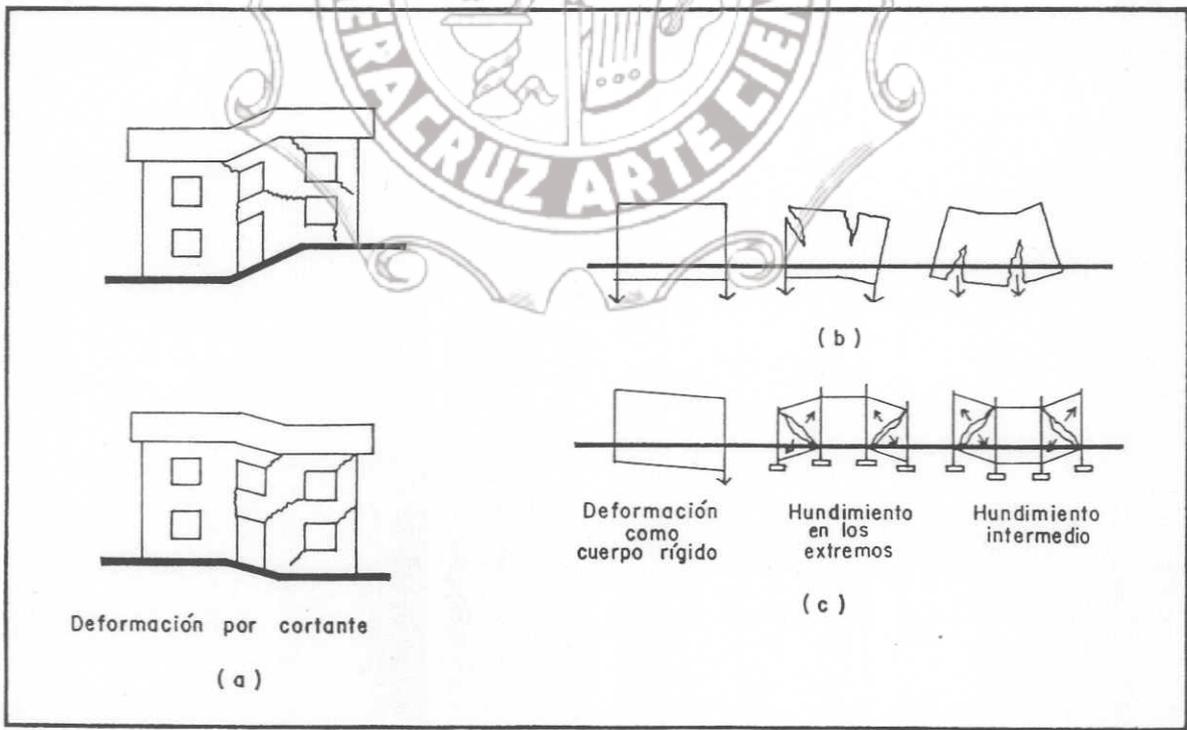


Figura 1.4.7 (a) Deformación de un muro por asentamientos diferenciales. Hundimientos de estructuras a base de (b) muros y (c) marcos.

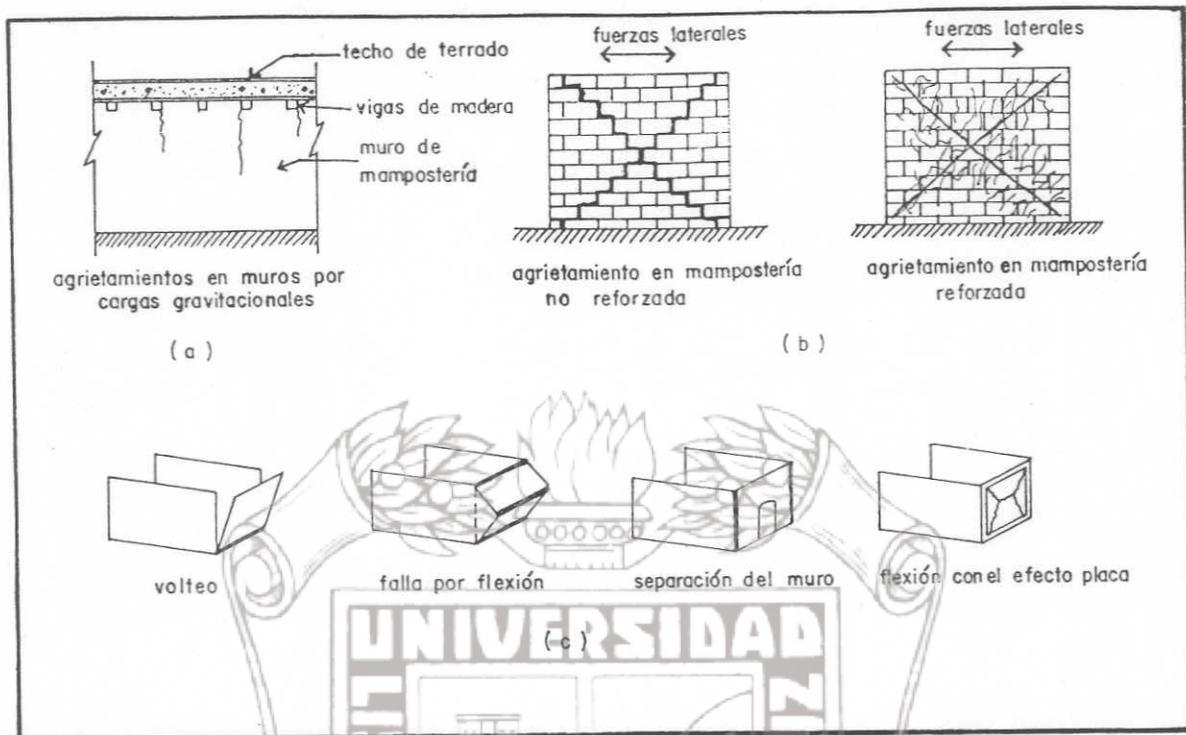


Figura 1.4.8 (a) Agrietamientos verticales en muros. (b) Grietas diagonales en muros reforzados y no reforzados debidos a cargas en su plano. (c) Mecanismos de falla de muros bajo fuerzas perpendiculares a su plano.

La figura 1.4.8c muestra los mecanismos de falla de un muro cuando la carga lateral, debida a sismos o viento, es perpendicular al plano del muro, su respuesta depende de las condiciones de continuidad en sus extremos. Bajo acciones sísmicas, el modo de falla más severo y frecuente en monumentos es el volcamiento de muros de fachada debido al empuje del techo. Cuando las fachadas no están ligadas al resto del monumento y además son pesadas y esbeltas pueden llegar a ser inestables debido a las fuerzas de inercia transversales a su plano y posteriormente volcarse.

La mayoría de los monumentos carecen de entrepisos y techos que funcionen adecuadamente como diafragmas que transmitan las fuerzas de inercia a los muros, generadas por el movimiento de las grandes masas en los últimos niveles. Pueden surgir grandes concentraciones de fuerzas laterales en algunos muros. En un movimiento sísmico la estructura sufre esfuerzos de tensión en el techo que podrían generar largas grietas, como sucede con las bóvedas (17).

Pueden presentarse excentricidades en los muros y hasta desplomes cuando las condiciones iniciales de carga varían por sismos, por asentamientos, pesos ajenos a la estructura original, retiro de elementos de entrepisos y muros o por apertura de vanos.

En los muros con columnas adosadas (pilastras), el espaciamiento entre ellas y el ancho de la columna determinan su relación de esbeltez (figura 1.4.9). Los muros se estabilizan lateralmente con las columnas cuando la relación entre la altura del muro (h) con el ancho de la columna (t_p) es mayor que cinco, mientras que si esta relación es menor que cinco, usualmente se consideran como muros de cortante.

1.4.2.3 Entrepisos y techos en edificios históricos

Los techos planos de madera de gran espesor son fáciles de afectar por la humedad, lo que puede alterar su comportamiento estático y reducir su resistencia a través del tiempo, también favorece la formación de hongos y el pudrimiento, los rellenos húmedos, ocasionados por instalaciones dañadas o por pendientes defectuosas, producen sobrepeso y pueden ocasionar el desplome del entrepiso o techo. Hay otros desequilibrios causados por secciones insuficientes, por errores constructivos, por defectos en la madera o por sobrecargas añadidas.

Diafragmas

Como se mencionó anteriormente un punto crítico en edificios históricos es la zona de unión del sistema de cubierta con los muros o columnas de soporte, debido a que no cuentan con diafragmas rígidos que transmitan las fuerzas de inercia.

Los elementos resistentes horizontales capaces de transferir fuerzas laterales a los elementos resistentes verticales se denominan diafragmas. El diafragma actúa como una viga horizontal de manera semejante a el alma de una viga "I" que resiste los cortantes (figura 1.4.10), sus bordes (muros perpendiculares) actúan como patines para resistir el momento flexionante si la fuerza se transfiere de manera directa, para esto la mampostería debe tener un adecuado refuerzo de tensión.

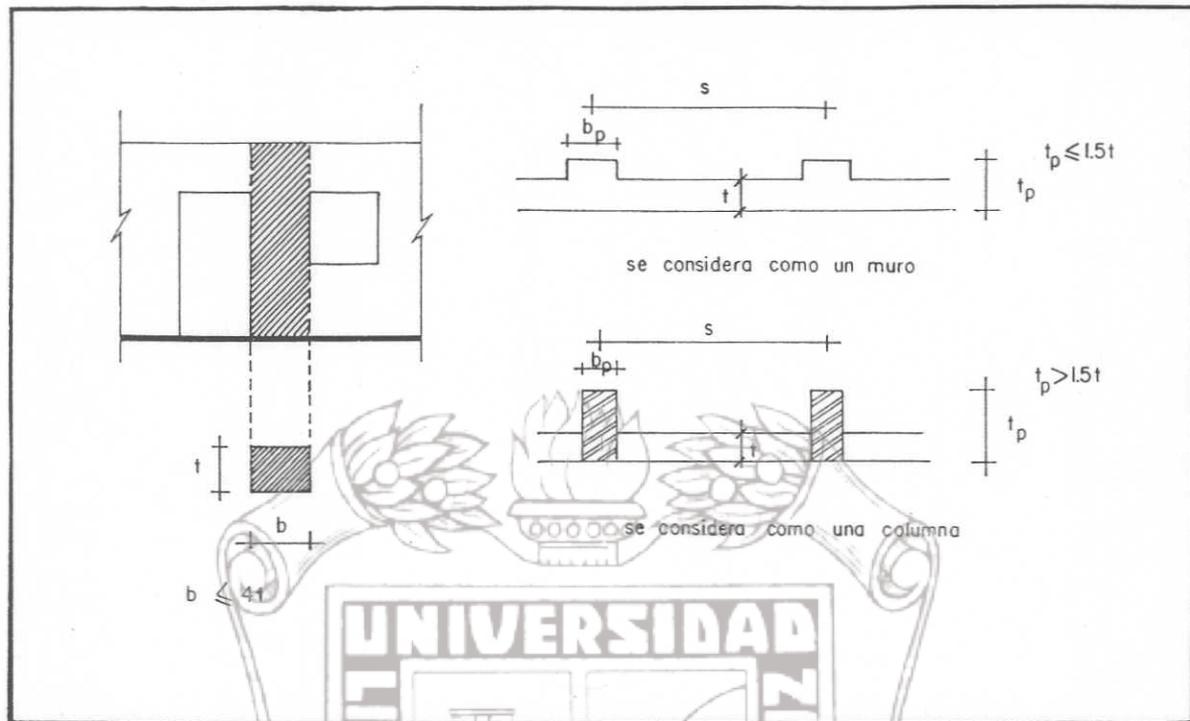


Figura 1.4.9 (a) Columnas formadas por vanos adyacentes. (b) Columnas adosadas en los muros.

Dependiendo del método de unión este refuerzo puede ser de madera, acero o cualquier otro material continuo conectado al extremo del diafragma, un ejemplo de esto se da en los edificios griegos mencionados con anterioridad.

Los diafragmas pueden ser flexibles o rígidos, los primeros son mucho más flexibles que los elementos verticales, cambian de forma bajo fuerzas laterales y se supone que actúan como vigas simplemente apoyadas con carga uniforme que cubren claros sobre apoyos que no ceden. En el caso de diafragmas rígidos, los muros son más flexibles que el diafragma y comparten las cargas en proporción a sus rigideces, el diafragma se supone que es una viga infinitamente rígida que se deforma igual que sus apoyos.

Los edificios históricos generalmente carecen de diafragmas rígidos, aunque los sistemas de piso planos de madera de Grecia, si cuentan con arriostramientos para hacerlos más resistentes a sismos (figura 1.4.10), cuentan con adecuados sujetadores y uniones que conectan las estructuras horizontales a los muros. Pero en nuestro país son entramados de madera sin contraventeo que pueden considerarse como diafragmas flexibles; a veces los sustituyen por losas de concreto que son mucho más rígidas.

Diafragmas flexibles

Los muros unidos con un diafragma flexible soportan cargas de acuerdo con las masas tributarias, por ejemplo, un muro central tiene el doble de área tributaria debido a que soporta el doble de la carga de cada muro de extremo, aún si estos últimos son más rígidos, estos diafragmas no transmiten momentos de torsión a los elementos resistentes.

Algunos reglamentos definen a un diafragma flexible como aquél cuya deflexión máxima es mayor que dos veces el desplazamiento medio del piso. Para determinar si el diafragma es flexible se compara la deflexión en el punto medio del plano del diafragma con el desplazamiento de los elementos resistentes verticales en ese nivel bajo la carga tributaria equivalente. Para que el diafragma y los elementos verticales no se desconecten en un sismo, las deflexiones para ambos deben ser las mismas.

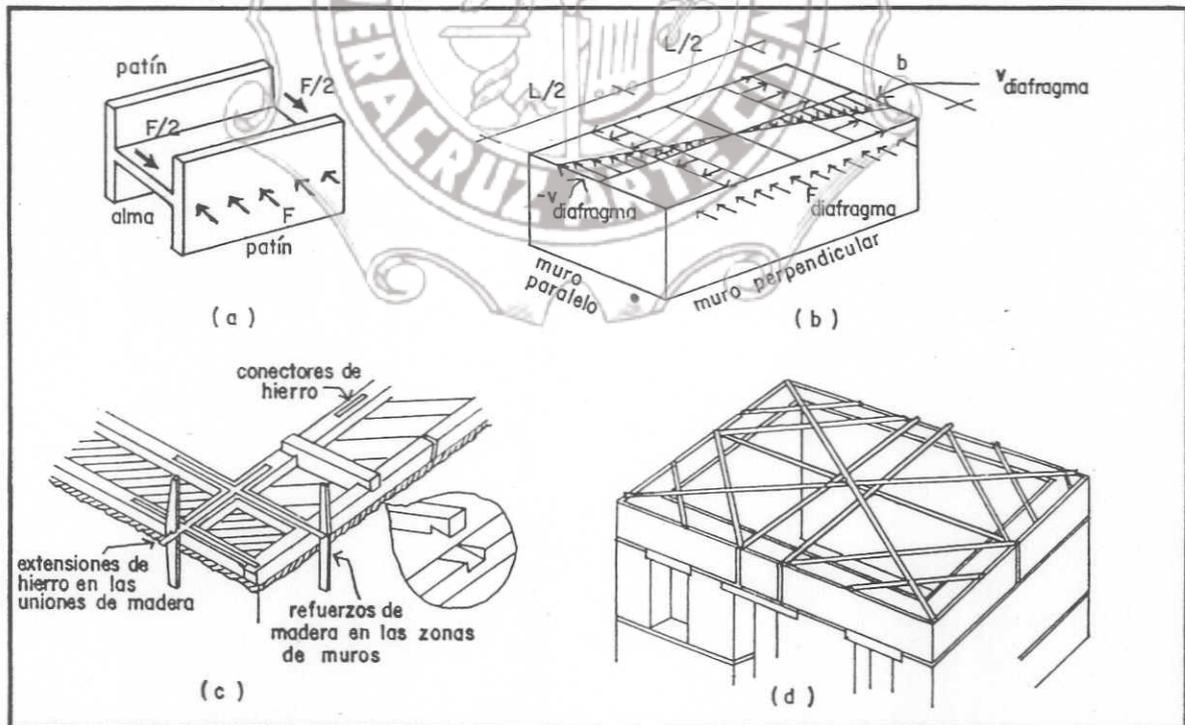


Figura 1.4.10 Analogía de viga diafragma. (b) Distribución de esfuerzos cortantes en un diafragma. (c) Conexión de los muros en las esquinas de los edificios y (d) ejemplo de una estructura de los techos en edificios antiguos de Grecia.

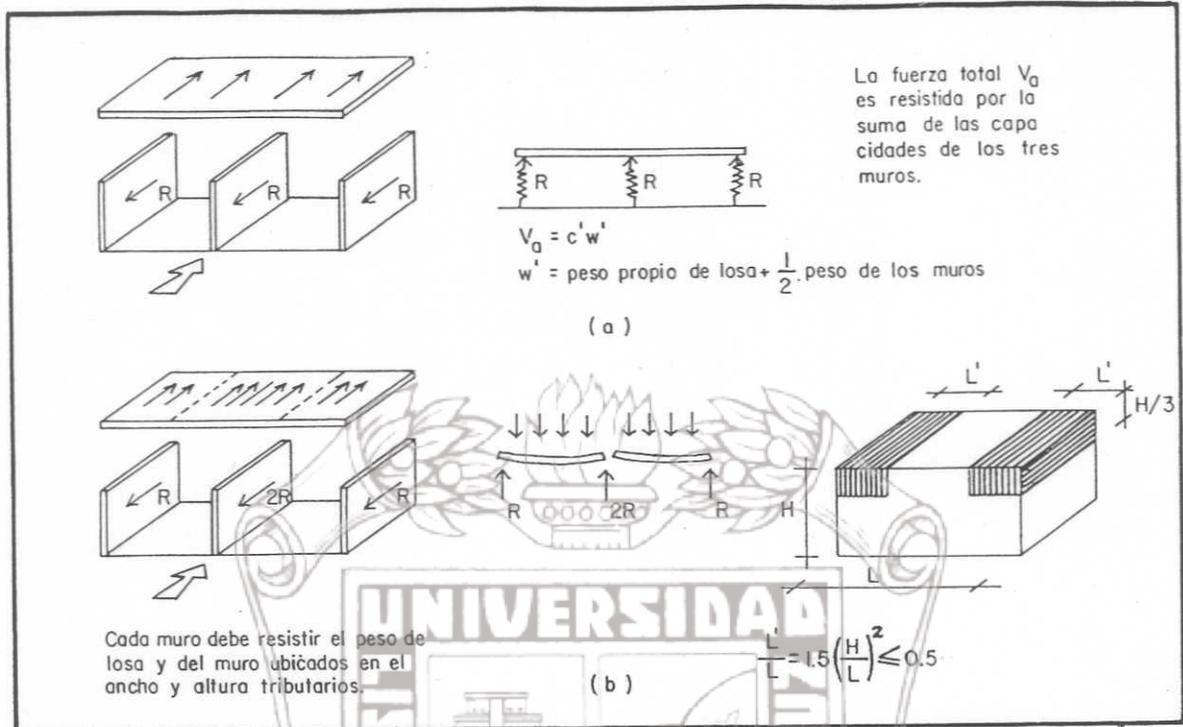


Figura 1.4.11 (a) Diafragmas rígidos y (b) diafragmas flexibles.

Esta deflexión puede ser el factor que limite la fuerza que pueda con seguridad aplicarse al diafragma y la limitante del desvío o deflexión de los muros perpendiculares a la fuerza, depende del tipo de material y sobre esto la autoridad debe especificar la limitante.

Algunos reglamentos no especifican los límites sobre la deflexión del diafragma pero limita tal deflexión a cantidades que mantengan la integridad estructural y proteja a los ocupantes. Los diafragmas deben ser lo suficiente fuertes para que permanezcan intactos bajo la acción de cargas sísmicas y del viento, y estar unidos de manera segura a los muros para que resistan las fuerzas paralelas y perpendiculares al muro.

El criterio para evaluar estos diafragmas y sus conexiones es el esfuerzo cortante del diafragma $v_{\text{diafragma}}$. Se supone que el esfuerzo cortante es uniforme a través de la longitud b (figura 1.4.10), la fuerza total es compartida por los dos muros paralelos a toda la profundidad b (13).

$$v_{\text{diafragma}} = \frac{F_{\text{diafragma}}}{2b} \text{ (por unidad de longitud)}$$

Se supone que el esfuerzo cortante del diafragma está distribuido linealmente desde cero en el punto medio ($L/2$) a $v_{\text{diafragma}}$ en los muros paralelos. Un diafragma flexible resiste cortantes en su plano, pero no tiene resistencia a los momentos, cuenta con la rigidez de los muros perpendiculares para limitar su deflexión total.

La determinación de la deflexión de un diafragma de madera contrachapada puede calcularse con la siguiente ecuación como una suma de la distorsión por flexión (primer término), distorsión por cortante (segundo término) y distorsión en los clavos (tercer término) (13):

$$\text{deflexion} = \frac{5vL^3}{8EAb} + \frac{vL}{4Gt} + 0.188Le_n$$

donde:

- v = cortante máxima
- L = longitud del diafragma
- E = módulo de elasticidad de la viga perimetral
- b = ancho del diafragma
- A = área de la sección de la viga perimetral
- t = espesor de la madera contrachapada
- e_n = desfazamiento de los clavos, con carga por clavo
- G = módulo de rigidez de la madera contrachapada

Cuando un diafragma presenta irregularidades en su forma y tiene puntos discontinuos en el plano se utilizan "colectores" para transmitir las cargas. Con estos colectores se obtienen subdiafragmas que pueden analizarse de manera independiente (figura 1.4.12a).

Las bóvedas actúan transversalmente como un arco (figura 1.4.12b), bajo cargas gravitacionales tienen buen comportamiento porque trabajan a compresión, el aumento o disminución en su claro por movimientos horizontales de sus apoyos origina agrietamientos (figura 1.4.12 c). Las grietas son diagonales cuando la fuerza cortante en la bóveda o en una cúpula rebasa la capacidad del material y paralelas al plano de su base cuando existe deslizamiento relativo en las juntas horizontales del mortero.

En una cúpula existen esfuerzos de compresión debido a la acción de arco, también hay esfuerzos de tensión o compresión paralelos a su base, llamados esfuerzos anulares, que generalmente no tienen problemas. La falla del tambor que soporta una cúpula, por una combinación de esfuerzos de flexión, torsión, carga axial y cortante ante acciones horizontales, puede llevarla al colapso (26).

Antiguamente el análisis de las cúpulas se guiaba por reglas empíricas hasta que analizaron el problema de las fisuras de la Catedral de San Pedro en Roma en 1748 (9), donde aplicaron el principio de desplazamientos virtuales y dedujeron la relación entre la fuerza horizontal, la altura de la imposta y el peso propio (figura 1.4.13).

1.4.2.4 Columnas

Debido a su gran espesor y a que las cargas se transmiten prácticamente de manera axial en edificios históricos, las columnas tienen buen funcionamiento bajo cargas gravitacionales. Pueden dañarse cuando las cargas son laterales debido a que los diafragmas flexibles le transmiten sus desplazamientos relativos y pueden originarse agrietamientos horizontales en las bases de las columnas. Si aumenta la excentricidad se produce flexocompresión y pueden presentarse agrietamientos verticales.

1.4.2.5 Arcos

Un arco es un conjunto de bloques de piedra, tabique, ladrillo u otros materiales pétreos ordenados de manera que los esfuerzos que se presentan en él son de compresión. De acuerdo a Roberto Hooke (1675), las partes en contacto de un arco se sostienen de la misma forma como cuelga un cable flexible, pero de manera invertida (figura 1.4.14). Si la línea de empuje entre las piezas de un arco se desvía un poco, produce esfuerzos importantes que lo llevan al colapso. El desplazamiento de un sexto del peralte de la costilla del arco duplica el esfuerzo máximo. Cuando la línea de presiones de estos esfuerzos van a todo lo largo del arco y pasan por su sección central, llamada "tercio medio" (figura 1.4.15 a), no se generan esfuerzos de tensión, sólo de compresión.

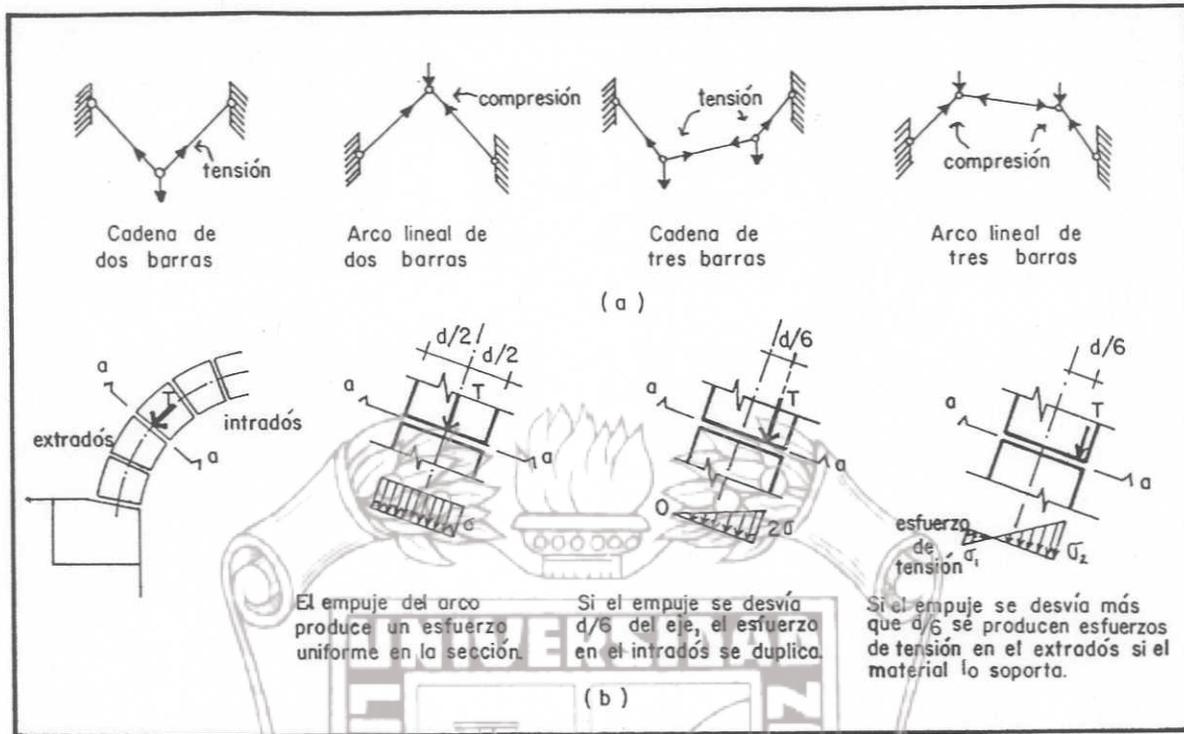


Figura 1.4.14 (a) Semejanza entre cadenas de barras y arcos. (b) Posición de la línea de empujes de un arco

El francés Danisy en 1732 fue de los primeros en darse cuenta que un arco de mampostería falla por la acción de un mecanismo (figura 1.4.15 a), intuyó que si la línea de presiones cae completamente dentro del espesor de un arco, éste debe ser estable, de lo contrario, la junta más cercana al punto de la línea de presiones que pase fuera de la costilla del arco, se abre y la dovela tiende a articularse en el borde, lo que ayuda a la formación de un mecanismo (9). Coulomb utilizó estas conclusiones posteriormente para desarrollar sus estudios sobre este tema.

Un arco ejerce sobre sus apoyos un empuje hacia el exterior y una presión vertical, el empuje hacia el exterior es el que requiere precauciones. En un arco semicircular la carga aumenta hacia los arranques y la línea de presiones no coincide con el eje del arco, está inclinada con respecto a la vertical, por lo que la base que sostiene estos arcos generalmente son elementos masivos, como muros o columnas de grandes espesores para evitar la inestabilidad de estos elementos (figura 1.4.16).

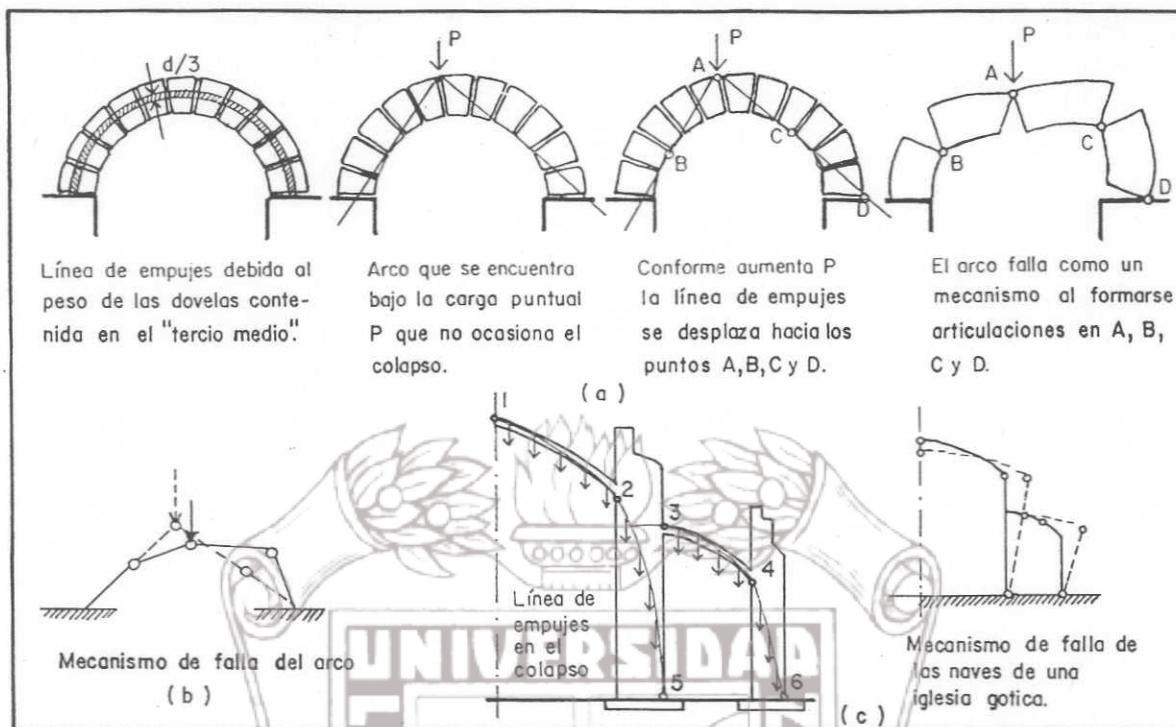


Figura 1.4.15 Mecanismo de falla de un arco de acuerdo a los estudios de Danisy.

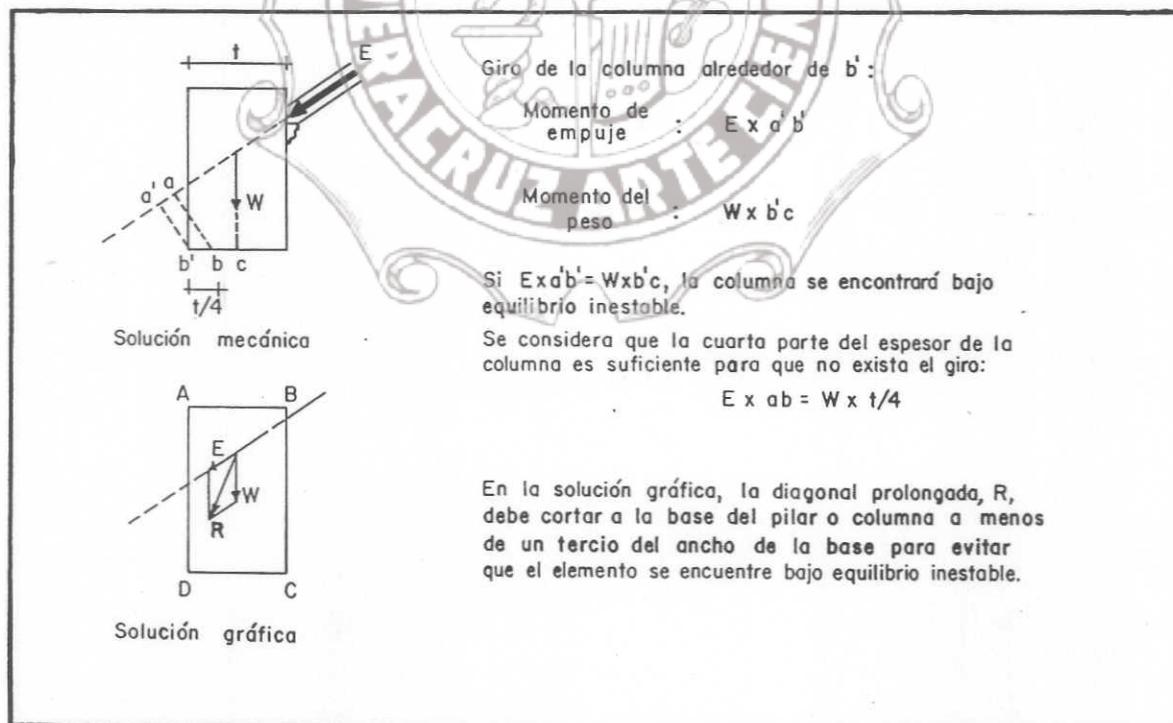


Figura 1.4.16 Empuje de un arco sobre una columna.

Instituto de Ingeniería Universidad Veracruzana

CAPÍTULO II

CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE VERACRUZ

2.1 Antecedentes históricos

En el año de 1519 Hernán Cortés llegó al islote de San Juan de Ulúa y días después fundó el primer Ayuntamiento, en lo que hoy es la ciudad de Veracruz. Debido a las inclemencias del clima se trasladó a la población hacia otros lugares cercanos, pero finalmente regresó al lugar original. En 1615 recibe el título de ciudad y debido a que sus edificaciones eran de madera se le denominó "ciudad de tablas".

Había muy poca densidad de construcciones, las cuales no llegaban a 200, las calles y plazas tenían mayor amplitud que las actuales. Sólo existían dos calles principales que corrían del noreste al sureste, llamadas calles Principal y de las Damas, hoy Independencia y 5 de mayo, respectivamente. También había otras calles pequeñas paralelas a éstas, así como las que atraviesan en ángulos rectos.

Los edificios de la llamada entonces "ciudad de tablas" estaban construidos en los márgenes del río Tenoya (figura 2.1.1) que desembocaba en el mar y pasaba a lo largo de la calle hoy llamada Aquiles Serdán, también atravesaba las calles Principal y de las Damas. A causa de graves incendios en la ciudad, a inicios del siglo XVIII, las autoridades establecieron el decreto de "cal y canto", con el que solicitaron a los pobladores que construyeran sus edificios de mampostería, pero al no existir bancos de piedra, utilizaron un coral llamado piedra "múcar" o "múcara".

Sus construcciones eran casas grandes utilizadas para recibir a los cargadores y viajeros de Europa así como sus mercancías, también se arrendaban a los pobladores de lugares vecinos que venían de compras a la ciudad. La planta baja de estos edificios regularmente servía de almacén para conservar mercancías, mientras que los siguientes pisos eran utilizados como vivienda. Ya en aquella época se observaban casas arruinadas que no reparaban sus dueños, a pesar de que las utilidades del comercio que mantenía la ciudad eran altos.



Figura 2.1.1 Veracruz con el río Tenoya (6).

Posteriormente la ciudad floreció con edificios de arquitectura importante, algunos de ellos aún se conservan. Desde el siglo XVII, cuando aún existía la ciudad de tablas, el zócalo ya era el lugar de las actividades urbanas de la ciudad de Veracruz, en donde se ubicó la "Casa de Cabildos", hoy Palacio Municipal, cuya construcción se inició en el año de 1608; era utilizada como vivienda del Gobernador de la plaza y de los intendentes de provincia; hoy alberga las oficinas de gobierno y en tiempos del México Independiente también fue cárcel. La altura de la torre es de más de 30 metros y está soportada por cuatro arcos. Debido a su estado de deterioro estuvo a punto de ser derribado por las autoridades en el siglo pasado (7).

La Parroquia de Nuestra Señora de la Asunción originalmente fue construida de madera en 1622, posteriormente se hizo de mampostería y se terminó de construir en 1727, con 30 metros de largo y 22 metros de ancho aproximadamente. Consta de tres naves que sostienen una bóveda y a los lados cuenta con capillas y altares, el coro está sostenido por una bóveda de 11 metros de alto; debido a su deterioro se le realizaron reparaciones de 1807 a 1810 y a partir del año de 1963 es la Catedral de la diócesis de Veracruz.

El Convento de Santo Domingo fue fundado en 1608 por la orden de los dominicos, a partir de la Reforma sufrió fragmentaciones, pero aún se conserva parte de la construcción, como la iglesia de tres naves de cuyo crucero se levanta la cúpula; en la actualidad se utiliza como bodega de telas.

El Convento de San Agustín El Nuevo o Convento de la Cía. de Jesús, fue de las primeras construcciones de mampostería, estaba unido a la iglesia con un patio central; el piso alto se destinaba a celdas y el bajo servía de bodegas. El Convento de Nuestra Señora de la Merced se construyó en 1613 y se vino abajo en 1857 debido a su deterioro y abandono.

El Recinto de la Reforma, anteriormente Convento de San Francisco, primero fué de madera y en 1715 se edifica de mampostería. A partir de la Reforma el edificio se seccionó y una de sus tres capillas fue destruida, el convento fué utilizado como hotel (Hotel Rex) y discoteque, actualmente funciona como hotel (Holliday Inn).

El Convento de San Sebastián o Betlemitas, actualmente el IVEC, se construyó de 1748 a 1775. Albergaba a enfermos convalecientes y era una pequeña escuela para niños; después fue hospital para hombres.

El Archivo y Biblioteca Históricos es la casa-habitación típica del siglo XVIII, se usó como vivienda y comercio. Consta de dos niveles y un entresuelo. El primer nivel servía como bodega, el entresuelo ocupaba oficinas y el segundo nivel se destinaba a la vivienda.

Posteriormente, durante el siglo XIX se construyó el Teatro Principal, conocido actualmente como Teatro Francisco Xavier Clavijero. Debido al incendio de 1819 se reconstruyó durante los años 1834-35 y a principios de este siglo el edificio presentaba fallas estructurales y descuido, por lo que ha tenido varias intervenciones. Después se construyeron la Estación del Ferrocarril (1850), el Museo de la ciudad (1852), antiguamente llamado Hospicio Manuel Zamora, el Casino Español (1864), la Beneficencia Española (1869), el café de la Parroquia (1881), el colegio La Paz (1890), la antigua Escuela Naval (1898), la Escuela Cantoral (1885), dañada por el ciclón de 1926 y

remodelada en 1927. En el siglo XX se construye la Aduana Marítima (1902), Correos y Telégrafos (1902), el último nivel del hotel Diligencias (1910), entre otros.

En este siglo, a partir de la década de los años cincuenta se ha transformado el centro histórico, esto ha dado por resultado la mutilación total o parcial de algunas construcciones históricas, como el convento de Betlemita que perdió uno de sus claustros para prolongar la avenida Ignacio Zaragoza, en otros casos han sido sustituidas por edificios modernos de mayor altura.

Esta ciudad aún cuenta con un número importante de construcciones históricas, pero un alto porcentaje de ellas se encuentra en estado de ruina, abandono y en ocasiones a punto de venirse abajo. Se presentan casos en los que sólo existe una fachada moderna, pero en el interior son estructuras antiguas que generalmente han sido transformadas introduciendo materiales nuevos junto con los tradicionales o eliminando algunos de sus elementos resistentes, de lo que resultan estructuras de distinto comportamiento a las originales.

2.2 Delimitación de la zona de estudio

De acuerdo a la catalogación hecha por INAH-Veracruz, en el Centro Histórico de esta ciudad se tienen tres perímetros, el perímetro A, de 1.5 kilómetros cuadrados aproximadamente, corresponde a la época de Veracruz amurallado; el perímetro B que abarca el barrio de la Huaca y el crecimiento de la ciudad hacia el este; el perímetro C refiere a los terrenos ganados al mar durante la ampliación del puerto a finales del siglo XIX (fig. 2.2.1). Con esta delimitación se tienen los siguientes datos dentro del área de cada perímetro:

Perímetro A:

179 Monumentos Históricos

43 Inmuebles Artísticos

137 Edificios Típicos

Perímetro B:

94 Inmuebles Artísticos

119 Edificios Típicos

32 Arquitectura Vernácula

Perímetro C:

5 Inmuebles Artísticos

2 Edificios típicos

La zona de estudio seleccionada es una parte del perímetro A, contiene los edificios más antiguos y todos los monumentos históricos existentes en la ciudad de Veracruz (figura 2.2.2). En esta zona se encuentra la mayor concentración del Patrimonio Monumental con sus diferentes sistemas constructivos, correspondientes a distintas épocas, además de que se observa un gran número edificios históricos transformados (figura 2.2.3).

La zona de estudio abarca las tres avenidas principales dentro del Centro Histórico: Independencia, 5 de mayo y Zaragoza, varias plazuelas y callejones. La gran mayoría de los negocios de las avenidas Independencia y 5 de mayo han sido deformados en su planta baja por las renovaciones de la "arquitectura moderna" y de las necesidades del comercio, mientras que en los segundos niveles todavía se conservan algunos elementos del edificio original.

El fin de esta delimitación es identificar sus materiales, elementos estructurales y la forma en que están unidos, sus deficiencias y buen funcionamiento a la resistencia sísmica y ante cargas gravitacionales, y las repercusiones debidas a transformaciones de su estructura.

El levantamiento se realizó en base al tipo de estructuración, a los sistemas constructivos y a la forma de la planta de la construcción, señalando, si estos aspectos han tenido alguna modificación o no. También se revisó el uso actual de la construcción y si este ha cambiado con respecto del uso original. Se revisó el estado actual de la edificación mediante tres niveles de calificación: bueno, regular y malo, además del número de pisos con que cuenta (Apéndice B).

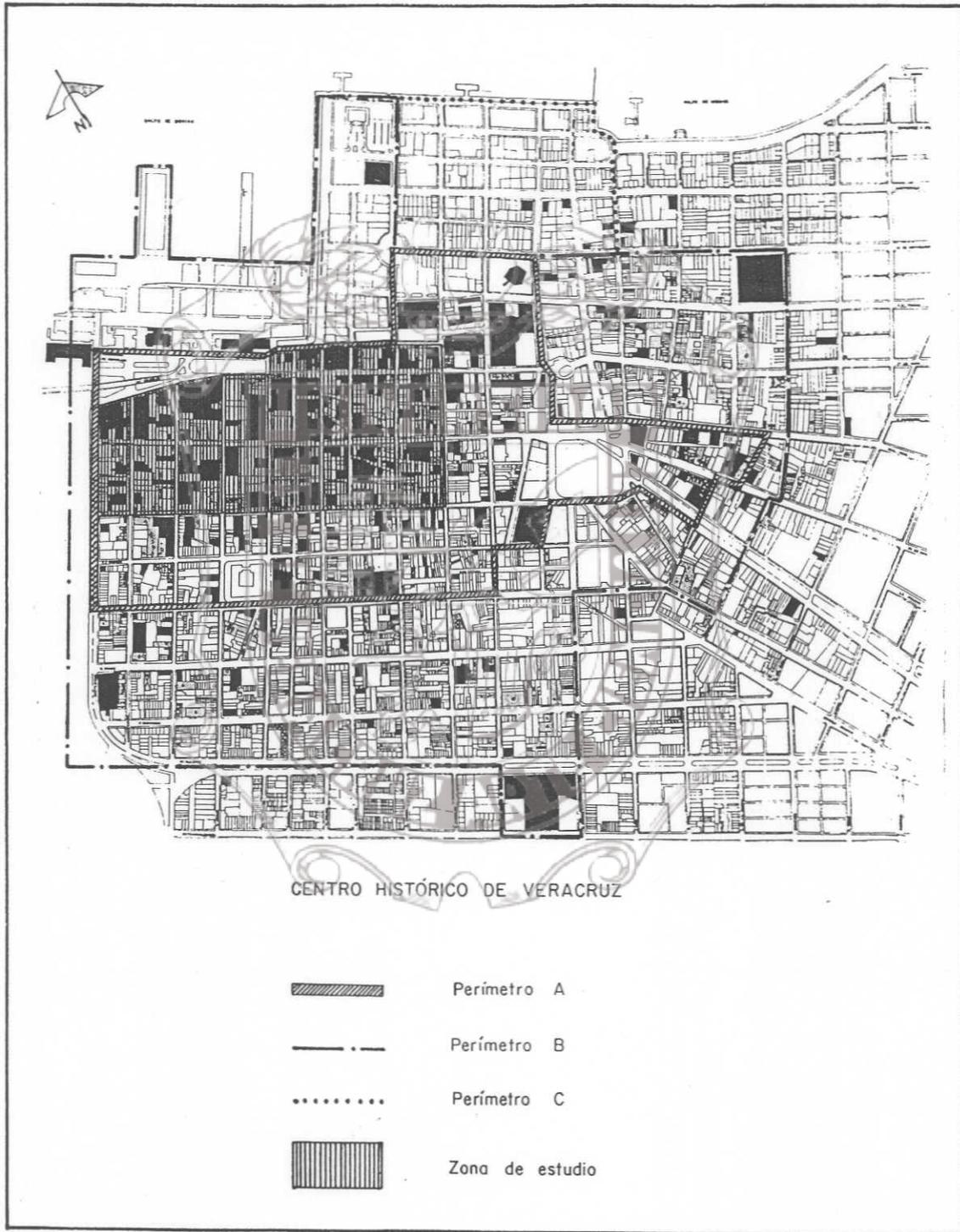


Figura 2.2.1 Delimitación del Centro Histórico de la ciudad y puerto de Veracruz.

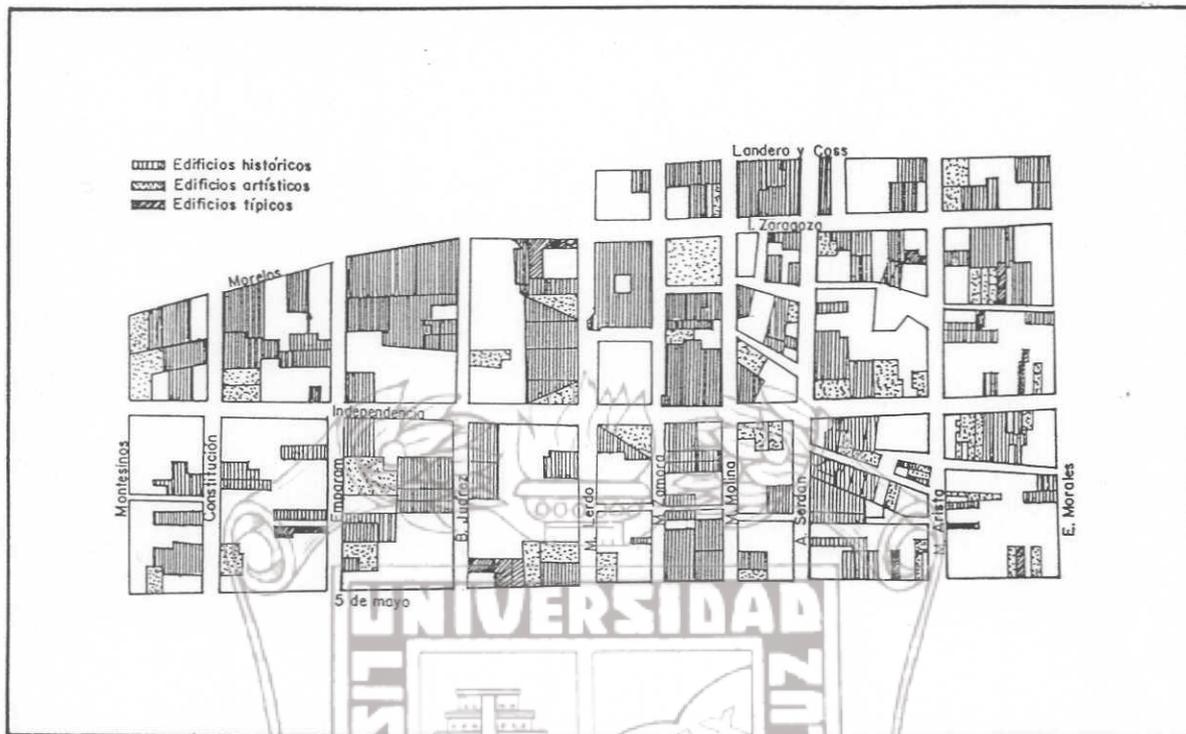


Figura 2.2.2 Delimitación de la zona de estudio.

2.3 Materiales y formas constructivas

Como se señaló en el capítulo anterior, para comprender mejor una estructura es necesario conocer las características de sus materiales y de los elementos que integran la construcción, identificando las formas, cualidades y dimensiones de estos elementos, además de conocer los procedimientos constructivos de la época en que se edificaron. Por esta razón a continuación se presentan algunas características generales de las construcciones históricas de la ciudad de Veracruz.

En el Centro Histórico de Veracruz se utilizaron materiales orgánicos, como los corales, maderas y conchas; también se encuentran materiales inorgánicos tales como los metales, tejas y ladrillos. El material común en la mayoría de los edificios es un coral pétreo utilizado para el mamposteo llamado piedra "muca", "múcar" o "múcara" (foto 2.3.1), que se extrajo de los arrecifes coralígenos que formaban una valla frente a las playas veracruzanas (25).

Para el Sistema Arrecifal Veracruzano se tienen registradas 29 especies de corales escleractinios y 10 de ellas son especies que forman esqueletos masivos que fueron utilizados en la construcción de edificios (4), las especies más comunes que se han observado son: *Colpophylia Natans*, *Montastrea Annularis*, *Montastrea Cavernosa* y *Diploria Strigosa*. Estos corales tienen distintas características, existen sólidos y consistentes, difícil de tallarlos, o blandos, desmoronables y ligeros. Las piedras más consistentes usualmente las utilizaban para cimentaciones (25).

Para los marcos de los vanos tallaron bloques de piedra "múcara" consistente, a veces intercalada con ladrillos (foto 2.3.2); por la dificultad de tallarla y conseguirla se construyeron solo de ladrillo posteriormente. Los cerramientos de puertas y ventanas primero fueron dinteles de madera o un arco en platabanda (dintel con dovelas) hecha de ladrillo y después se hicieron de acero (figuras 2.3.1 a y b). Los arcos de medio punto o rebajados que presentan los patios o portales son también de ladrillo (figura 2.3.1 c).

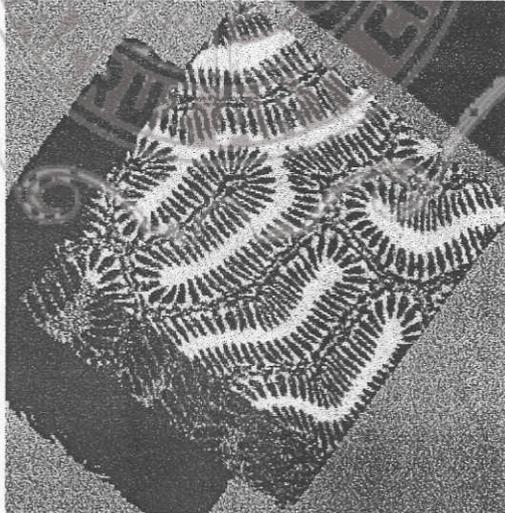


Foto 2.3.1 Coral *diploria strigosa*.

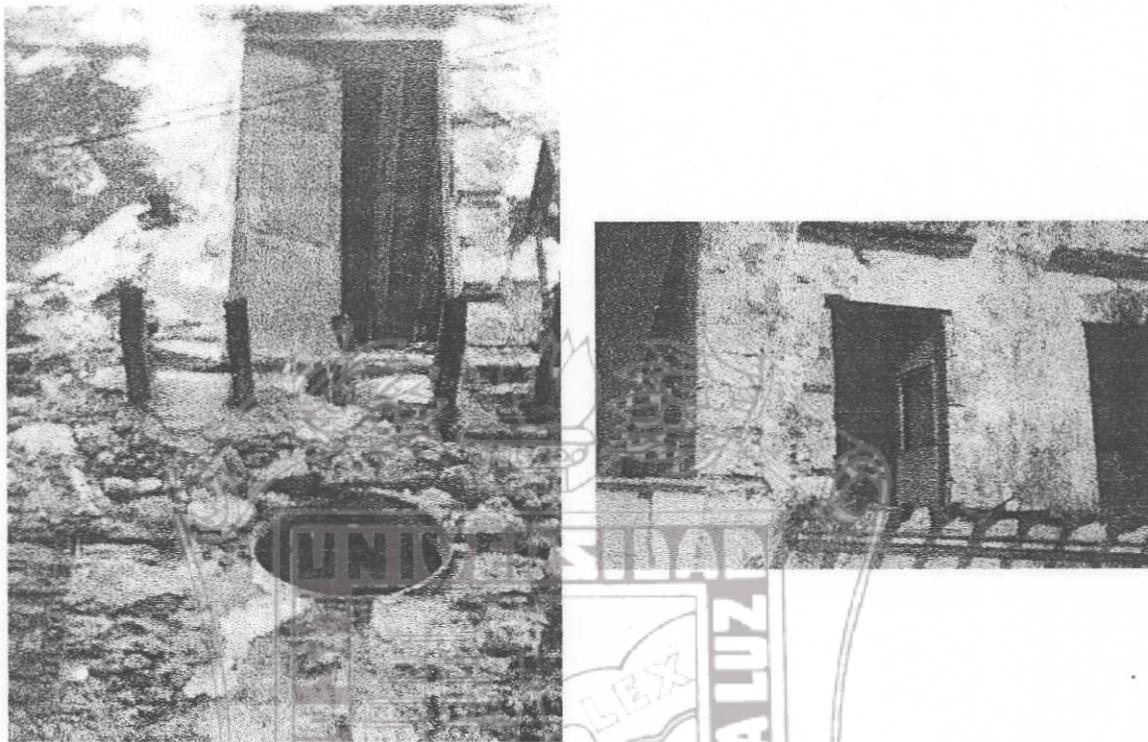


Foto 2.3.2. Aparejo en las jambas de puertas y ventanas

La construcción del edificio de "Hornos" indica el cambio en el sistema de construcción a mampostería, en este edificio se elaboraba la cal utilizada en el mamposteo (6). De acuerdo a un análisis realizado en una muestra del mortero perteneciente a un muro de mampostería del edificio histórico ubicado en la calle B. Juárez entre Independencia y 5 de Mayo, se encontró que la muestra del mortero está compuesta por cal y arena, y la proporción de dicha mezcla es de 1:1. Para conocer a profundidad los morteros utilizados en el mamposteo son necesarios más análisis que permitan conocer las características de otras muestras de mortero.

Las fachadas de la Parroquia y del Portal de la Parroquia estrecharon la calle Independencia, también la Plaza Mayor fue más amplia en sus principios, el Palacio Municipal, la Parroquia y los Portales se extendieron hacia dicha plaza. Los arcos viejos del Palacio Municipal se convirtieron en puertas cuando se hicieron los nuevos arcos y la torre se construyó un siglo después de que se terminó dicho edificio (6).

Los edificios históricos de la ciudad de Veracruz presentan diversas configuraciones de su sistema estructural pero hay algunas que desde épocas pasadas se regularizaron y homogeneizaron y que aún se presentan frecuentemente. Una de ellas consta de un cuarto grande con ventanas sobre la fachada, a cuyo lado, generalmente el derecho, se abre la puerta con un pequeño zaguán; cuartos menores se acomodan en fila en un lado hacia el fondo del terreno, formando una "L" y dejando al otro lado un patio (figura 2.3.2 a), a veces se presentan otros cuartos que cierran la "L" en "C".

Es común encontrar construcciones con patio central de diversos tamaños, son grandes en edificios públicos y religiosos (foto 2.3.3), y pequeños en casas-habitación, en éstas ocupaba aproximadamente la séptima parte del área total de la construcción en el primer nivel. Generalmente están porticados en sus cuatro lados y sobre ellos descansa la cubierta de madera o de bóveda catalana. La forma de este tipo de construcción generalmente es rectangular y simétrica con gruesos muros perimetrales de mampostería (figura 2.3.2 b).

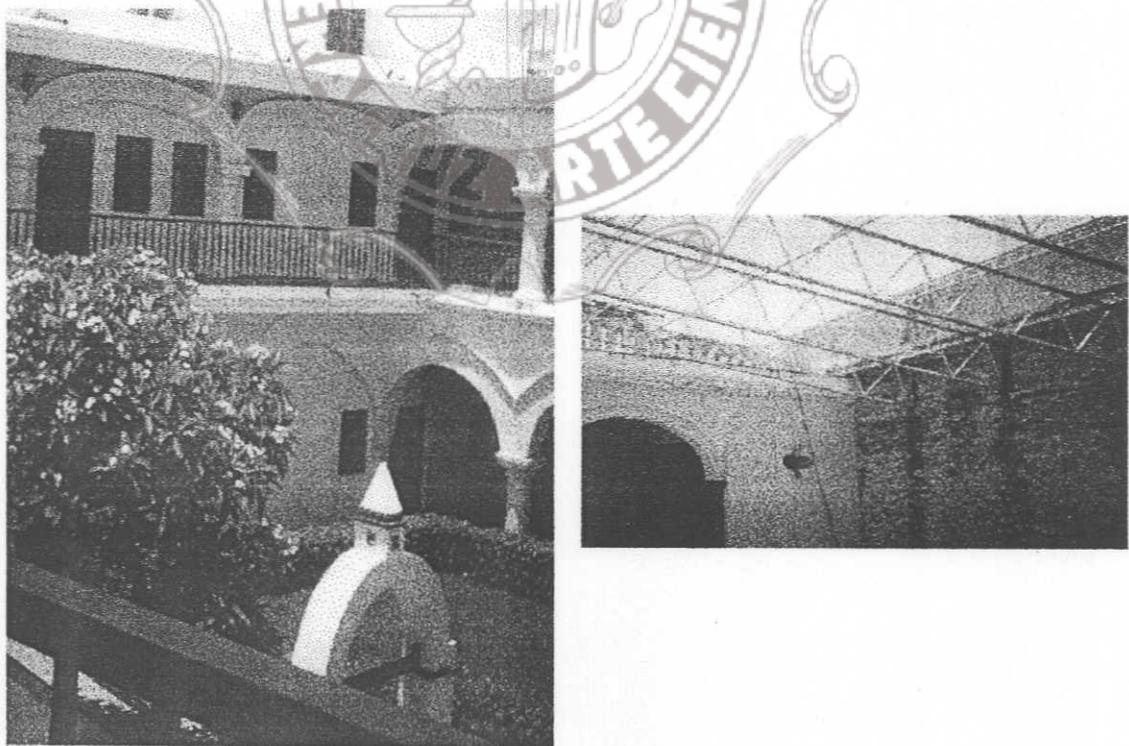


Foto 2.3.3. Edificios con patio central y medio patio.

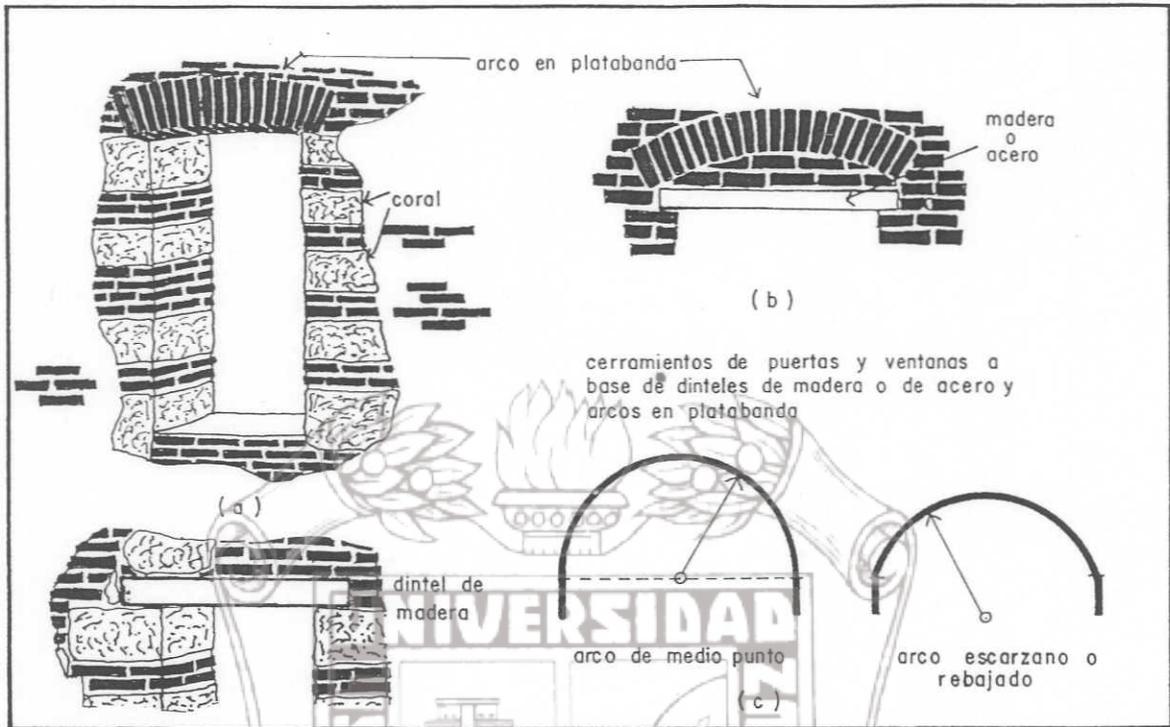


Figura 2.3.1 Cerramientos de vanos y tipos de arcos en edificios históricos de la ciudad de Veracruz.

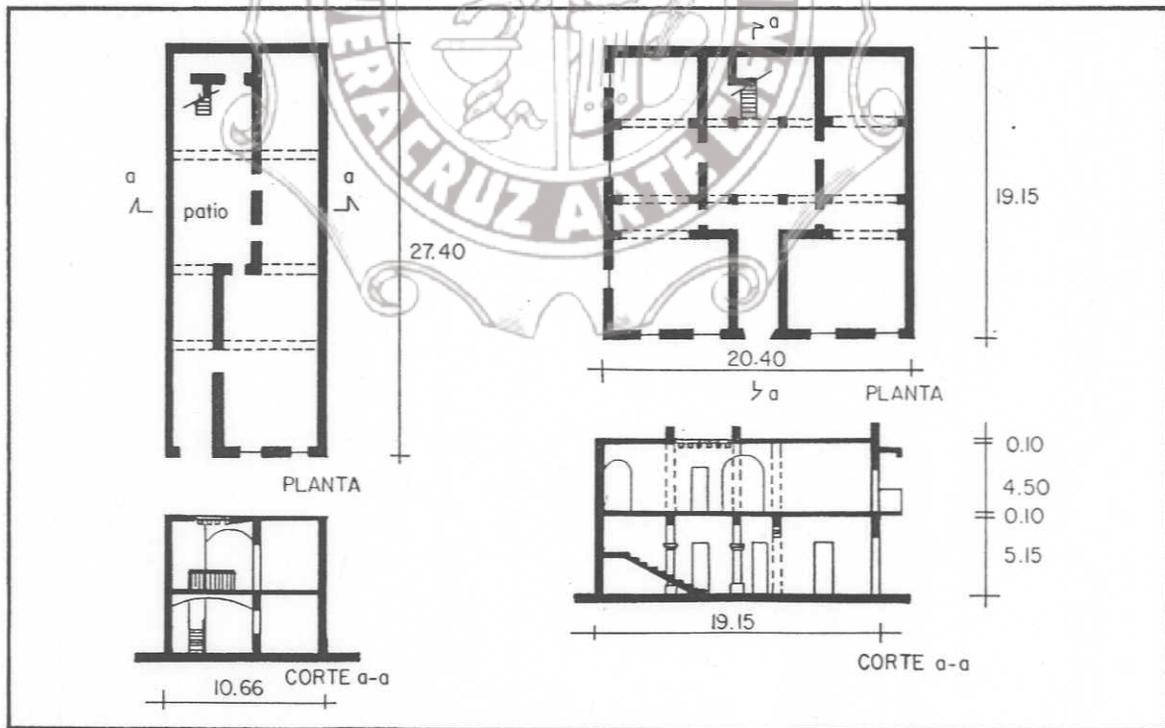


Figura 2.3.2 Plantas y corte de edificios típicos del centro histórico de Veracruz (27).

En algunos casos las construcciones con patio central fueron divididas, de esta manera apareció la casa de "medio patio", después de un tiempo se realizó esta configuración independientemente de la partición del predio (25). Originalmente el patio consta de tres lados porticados con arcos o platabandas y el cuarto lado tiene un muro ciego; también pueden tener dos lados porticados y uno con crujiás y ventanas o bien tienen dos lados con arcos.

Se encuentran algunos ejemplos de la llamada "casa entresolada", que consta de un primer piso de gran altura al nivel del suelo, después un piso de altura mucho menor que el anterior y un tercer nivel también de mayor altura. Es frecuente encontrar escaleras diferentes para el entresuelo y el piso superior, debido a su diferencia de uso, el primer piso se usaba para servicios y dependencias, el entresuelo para vivienda de la servidumbre y el superior para los habitantes de la familia.

Los vanos en las casas de un solo piso son verticales y rectangulares, el área de los vanos es aproximadamente igual a la de los macizos, con el fin de evitar la insolación los vanos no son muy grandes. Las ventanas de niveles altos cuentan con balcones que sirven de tejado a los vanos inferiores.

A través del tiempo y debido a las necesidades de uso de cada época estas construcciones se han modificado de muy diversas formas, en algunos casos se han añadido elementos estructurales y en otros se han eliminado, ocasionando cambios en su resistencia y rigidez debido a que con esto no tienen la misma masa ni la misma configuración de sus elementos.

2.4 Sistemas estructurales resistentes

La estructuración de los edificios antiguos de la ciudad de Veracruz es principalmente a base de muros de carga de un espesor considerable, se desconoce la ley constitutiva para el tipo de material de que están constituidos, además de que su uso no fue común en otras zonas a excepción de algunas regiones del Caribe.

De acuerdo a los datos recabados en la zona de estudio (Apéndice B), existe una gran cantidad de edificios históricos estructurados a base de muros de mampostería no reforzada de piedra "múcar"; los espesores de estos muros varían desde cincuenta centímetros hasta más de un metro y su altura entre niveles consecutivos es de cuatro a cinco metros.

El tipo de aparejo es muy variable así como las especies de corales empleadas, siendo muy frecuente encontrar muros mixtos de piedra "múcar" unida con ladrillos, por lo que el material resulta heterogéneo (fotos 2.4.1 y 2.4.2). Otro aspecto que aumenta la heterogeneidad es que existen edificios construidos con mampostería de piedra "múcar" en sus plantas inferiores, mientras que los últimos niveles son de ladrillo o mixtos.

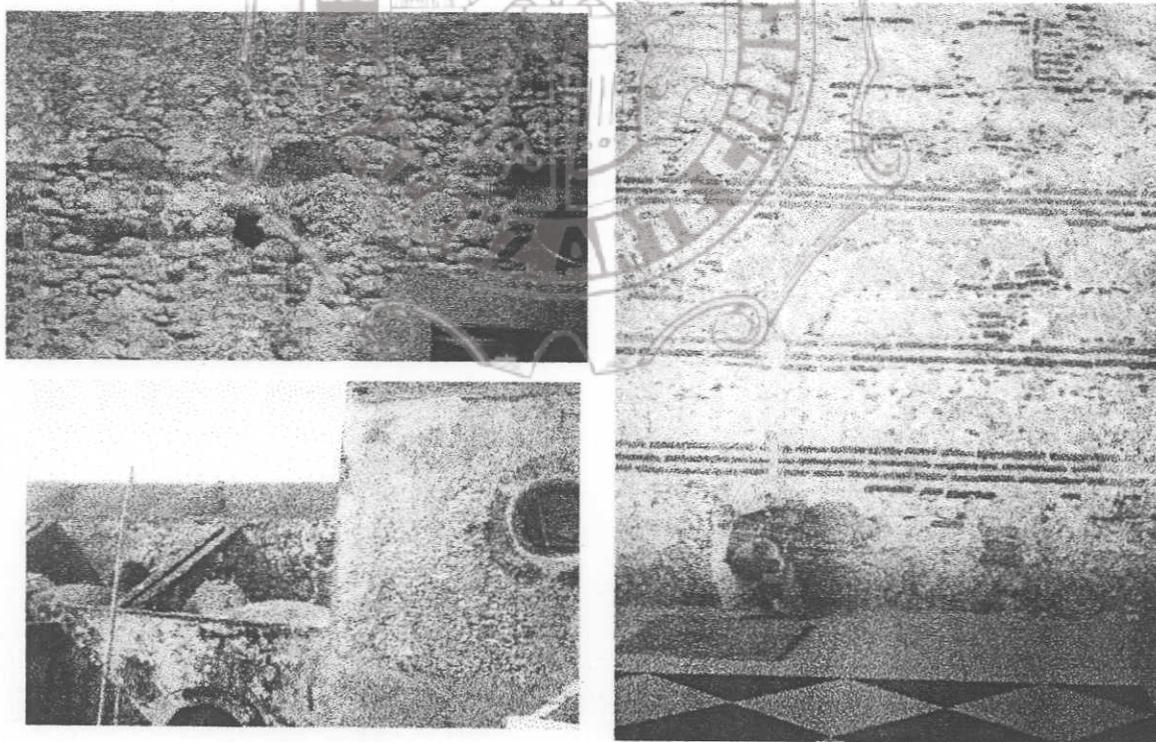


Foto 2.4.1 Aparejo en muros.



Foto 2.4.2 / Aparejo en muros.

En algunos edificios el espesor de los muros disminuye en las plantas altas, también existen muros con pilares adosados (pilastras) que sirven como elementos que rigidizan el muro y ayudan a mantener la línea de presiones cuando les llegan arcos. En otros casos el mismo muro, debido a su gran espesor, sirve como pilar (muro pilar) sobre el que descansan los arcos que soportan el techo o entrepiso, esto se encuentra en varios edificios, principalmente viviendas (figura 2.4.1).

También son típicas las arquerías que descansan sobre columnas de mampostería, el espesor de los arcos es el mismo que para los muros, generalmente las dovelas de los arcos son de ladrillo y el resto es de coral. Las columnas son de grandes dimensiones, de ladrillo o de piedra "múcar", su espesor generalmente es el mismo que el de los muros de la construcción y en algunos casos se encuentran columnas circulares de diámetro variable o de acero (fotos 2.4.3 y 2.4.4).

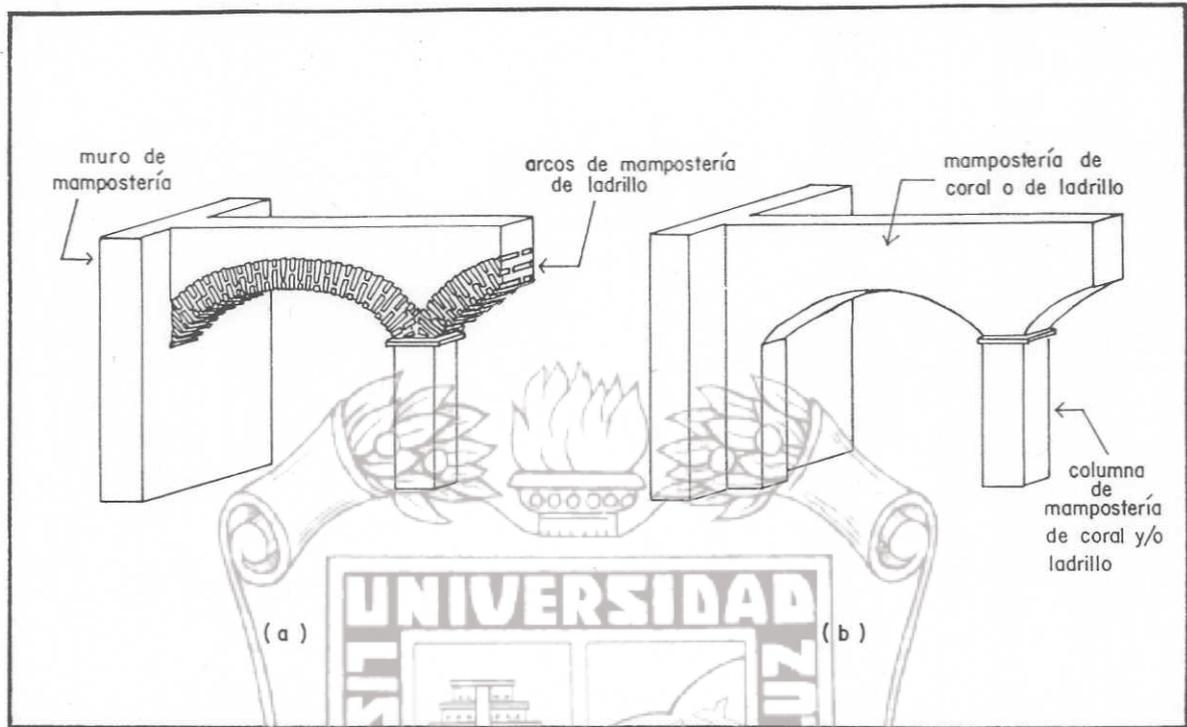


Figura 2.4.1 Ejemplos de muro-pilar y pilastras.



Foto 2.4.3. Arquerías y columnas de diámetro variable.

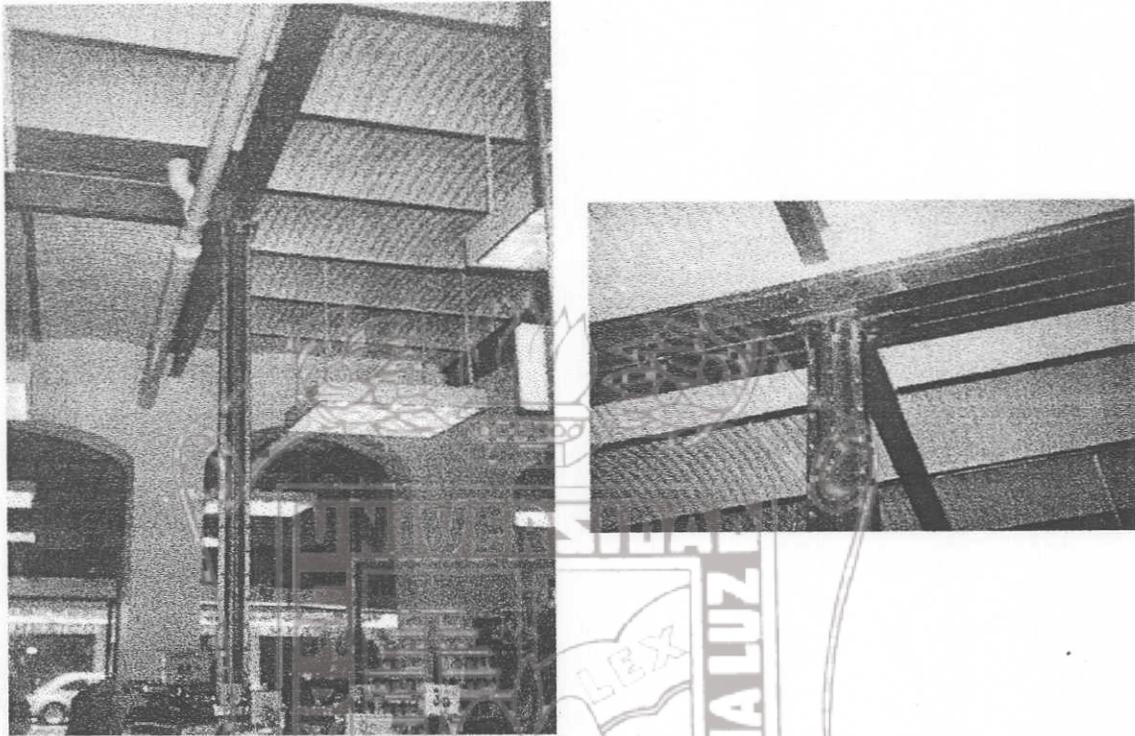


Foto 2.4.4. Columnas y vigas de acero que soportan un entrepiso de bóveda catalana.

Los entrepisos y techos son del mismo tipo que los construidos en otras partes de nuestro país en esas épocas, como los techos planos de terrado o de bóveda catalana. Con los cambios de entrepisos a losas de concreto reforzado se logran diafragmas rígidos en vez de flexibles, pero es necesario que el piso esté conectado apropiadamente para que los muros funcionen como muros de cortante. En construcciones religiosas se utilizaron cubiertas curvas como bóvedas de cañón corrido y cúpulas (foto 2.4.5). En los siguientes incisos se da una descripción más detallada de estos sistemas resistentes horizontales.

a) Terrado

El sistema de terrado está formado por un entramado de vigas principales apoyadas en los muros o arquerías y vigas secundarias apoyadas en las primeras. Generalmente, en el perímetro se encuentra una viga llamada de arrastre apoyada en los muros y en donde

descansan las vigas secundarias. Sobre este entramado de vigas de madera colocaban piezas de barro cocido o duela, seguidos por un relleno de tierra cubierta por dos o tres capas de ladrillo (figura 2.4.2), para los techos el relleno servía para dar pendiente. Las piezas de barro usualmente son soleras de unos cincuenta centímetros apoyados de viga a viga.

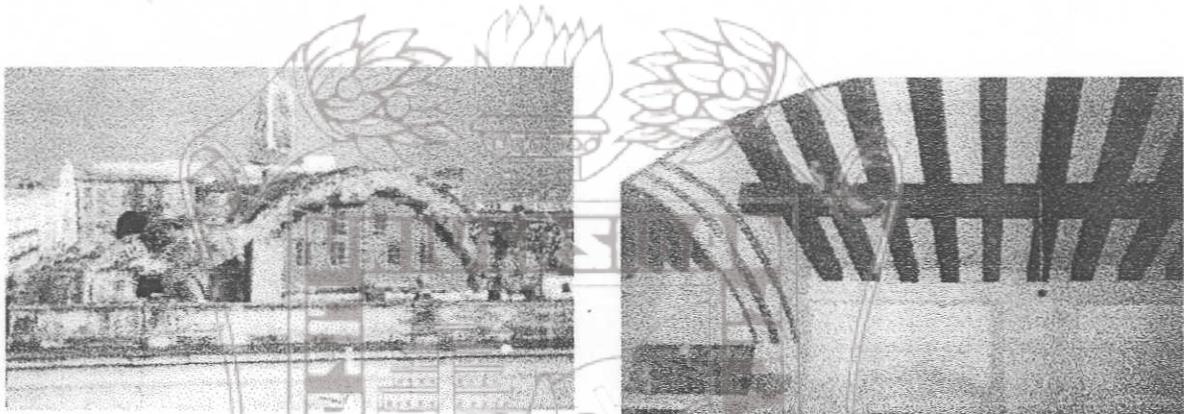


Foto 2.4.5. Bóveda y entresijos originales.

b) Bóveda catalana

Este sistema consta de viguetas "I" o rieles de acero que soportan una lámina de zinc o ladrillos (11) mediante una bóveda que sigue una curva de trazo geométrico o de curva libre con flecha muy reducida (figura 2.4.3). Si no tiene buen mantenimiento y existen filtraciones de humedad puede deteriorarse fácilmente; si se oxida la vigueta disminuye la sección resistente y puede no ser suficiente para resistir cargas.

c) Bóvedas y cúpulas

Están formadas por ladrillos unidos con morteros de cal-arena. Las bóvedas descansan sobre gruesos muros y las cúpulas están sobre tambores. Estas cubiertas se encuentran en exconventos e iglesias.

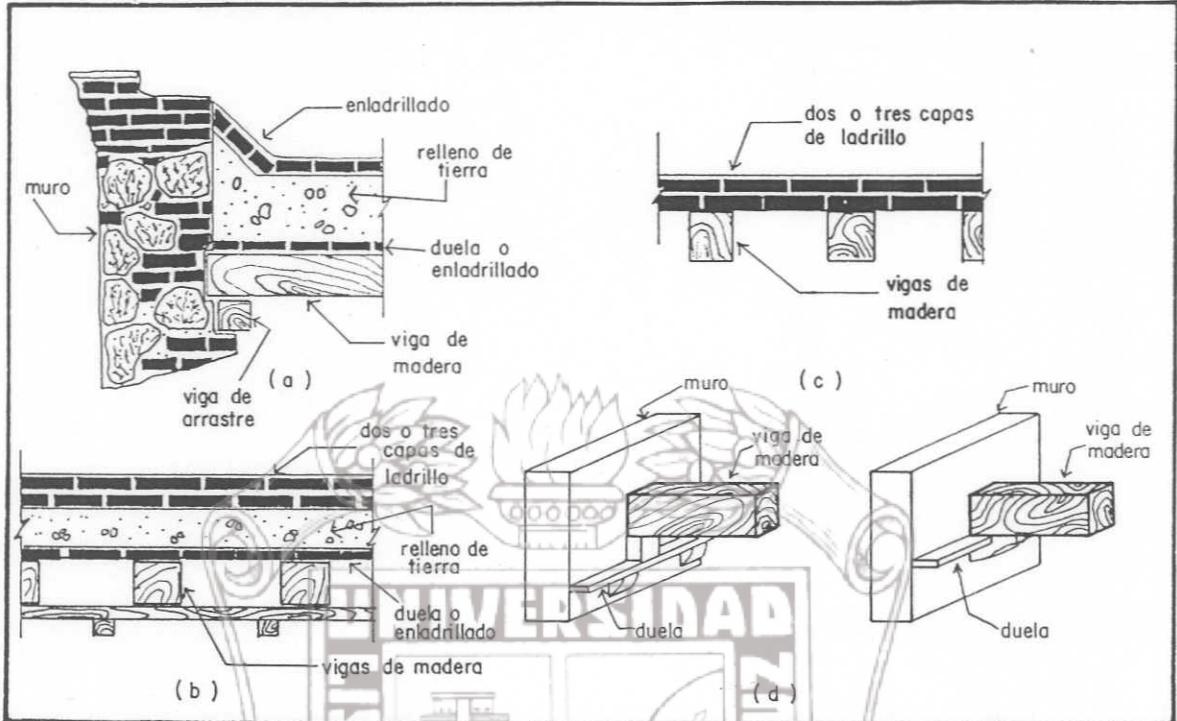


Figura 2.4.2 Sistema de techo y entrepiso de terrado.

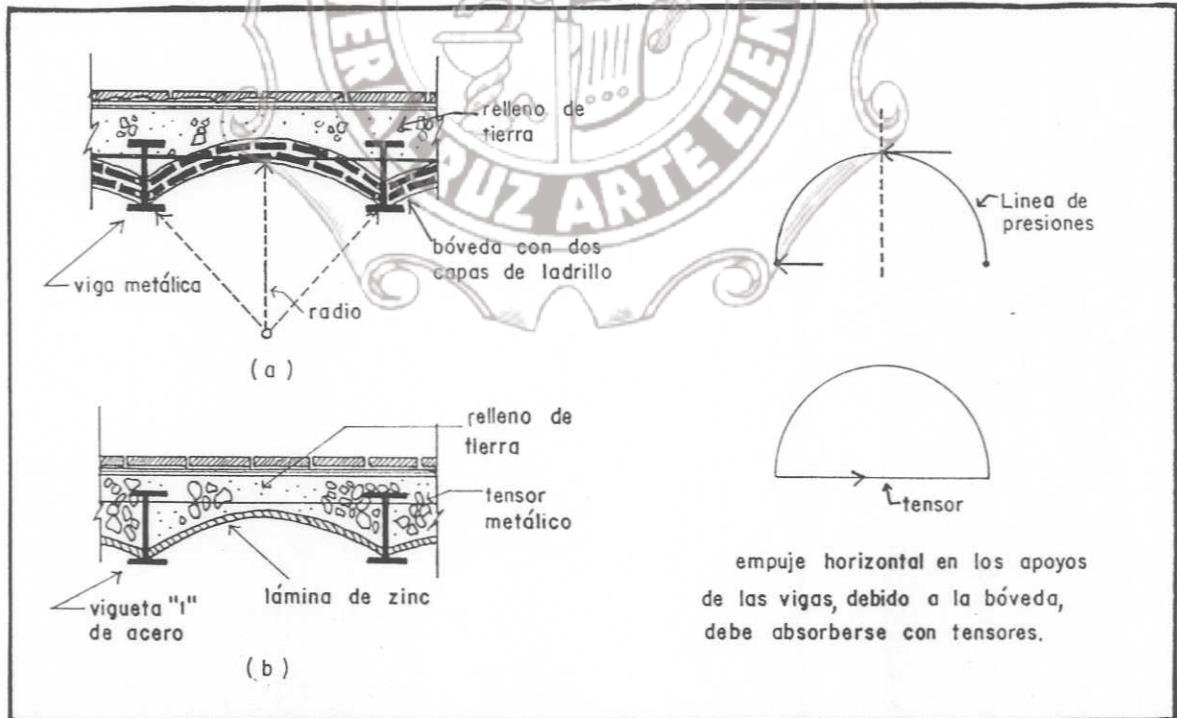


Figura 2.4.3 Sistema de techo y entrepiso de bóveda catalana.

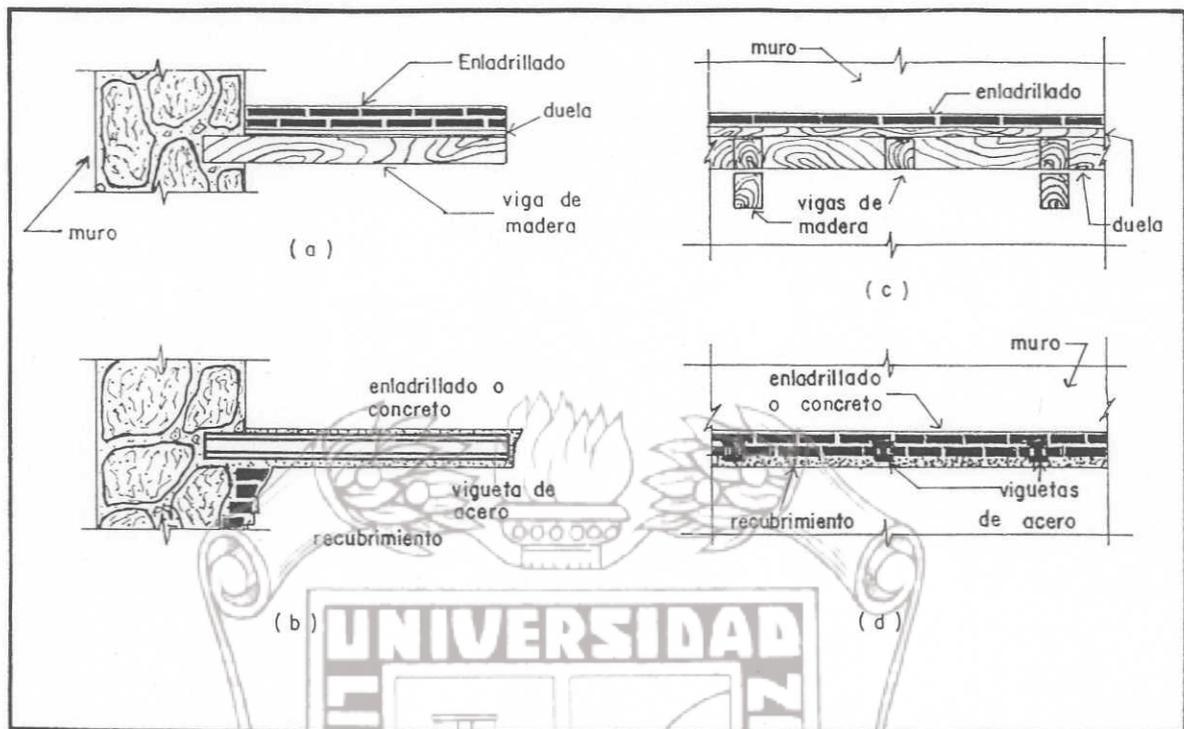


Figura 2.4.4 Ejemplos de balcones en edificios históricos de la ciudad de Veracruz.

d) balcones

Las construcciones históricas de la ciudad de Veracruz tienen la característica de contar en sus niveles altos con balcones de diversos sistemas constructivos de acuerdo a la época en que se realizaron (figura 2.4.4), muchos de ellos actualmente se encuentran en muy malas condiciones, por lo que requieren repararse con prontitud debido al peligro que representan para los transeúntes. Es común que se desprenda el recubrimiento que hay bajo los balcones especialmente en los construidos con vigüetas de acero.

2.5 Acciones

2.5.1 Sismicidad de la ciudad de Veracruz

En el estado de Veracruz, existe la necesidad de formular reglamentos de construcción en los que se considere el diseño sísmico para evitar pérdidas y daños mayores que los sismos puedan generar en el futuro, como lo hicieron en el pasado.

De acuerdo con la carta sísmica de México (figura 2.5.1), publicada en el Manual de Obras Civiles por la Comisión Federal de Electricidad (1993), el Estado de Veracruz tiene tres delimitaciones: la zona A, que es la de menor intensidad sísmica, comprende una parte del norte del Estado; mientras que la zona C, al sur del Estado, es la de mayor intensidad, la ciudad de Veracruz se encuentra en la zona B, comprendida entre las dos anteriores. De los sismos registrados instrumentalmente en el Estado, se han localizado trece epicentros en las zonas B y C (8).

Es probable que los primeros pobladores de nuestro país tenían más temor a las fieras y tormentas que a los sismos. Cuando empezaron a construir sus viviendas y éstas se destruían por efecto de un sismo, conocieron el miedo a los terremotos. Se tiene como referencia que el primer movimiento destructor, a partir de la conquista, ocurrió en 1523, en los siglos siguientes se presentaron varios movimientos telúricos de consideración que afectaron varias construcciones, algunas de ellas todavía existentes. Los daños causados por esos temblores fueron importantes acorde con la descripción de los pobladores de aquella época. A continuación se presenta un párrafo de un escrito publicado en la referencia (1):

“...un violento terremoto en la noche del 9 al 10 a las 12 y cuarto, con corta diferencia, se experimentó despertando el estremecimiento a cuantos... El estremecimiento fue de corta duración, pues aunque se redobló en el mismo que empezó, no llegó a durar un minuto pero la fuerza fue tal que parecía venirse al suelo edificios convertidos en destrozos. Y lo califica el daño que en ellos se ha reconocido, pues en todos se ven señales de ser principio de ruina. Los arcos y bóvedas de las iglesias han quedado rajadas, más o menos, una que otras; las paredes de las casas, cuarteadas, con grietas que están inhabitables, siendo preciso demolerlas de este general daño. Se infiere que de haber durado medio minuto más todo hubiera venido al suelo. Esto mismo se avisa de Orizaba, en cuyas inmediaciones, según las señales, es donde hizo el primer movimiento fue, en cuanto a violencia, bien que no se han encontrado señales de erupción. Aunque el estremecimiento fue, en cuanto a violencia, lo más que se haya experimentado no se percibió en el mar el correspondiente, solo sí haber excedido a sus márgenes cosa de 8 varas ...”

También se han presentado sismos de importancia a lo largo de este siglo, aunque no se tuvieron grandes daños en las construcciones históricas es muy importante resaltar el peligro que existe especialmente por la falla de Zocambo que entra al Estado por la zona de Teocelo y se interna en el Golfo de México en las inmediaciones de la ciudad y puerto de Veracruz, por Mocambo (8). La importancia se debe a que el efecto sísmico es mayor en la trayectoria de las fracturas o en las fallas, así como en arenas de playa, en terrenos blandos o mal consolidados y lugares ribereños. Ninguna región puede considerarse libre de efectos sísmicos, el antecedente de un movimiento destructor ocurrido en el pasado, implica mayor posibilidad de su repetición en el futuro. Instrumentalmente se han registrado en el estado de Veracruz alrededor de sesenta y cuatro sismos (1523-1966), trece de ellos han sido de una intensidad mayor que cinco (tabla 2.5.2).

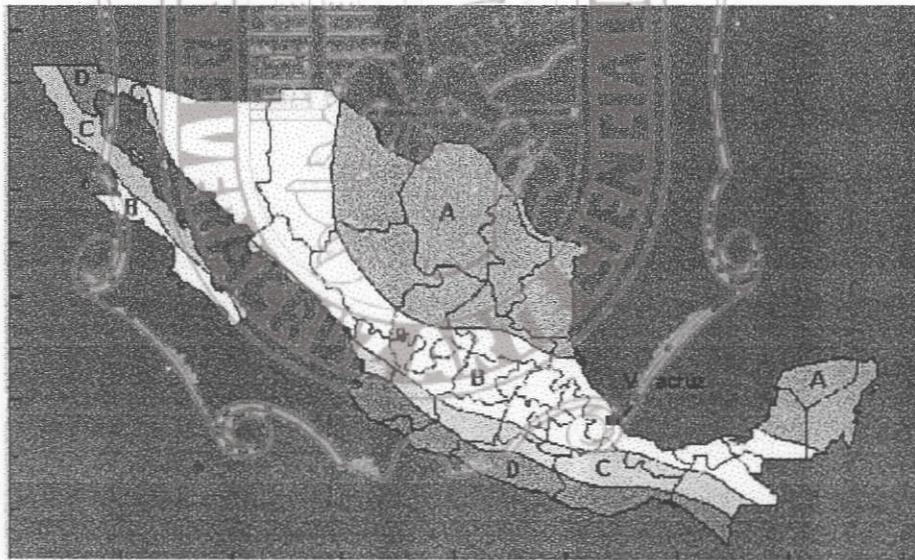


Figura 2.5.1 Zonificación por riesgo sísmico de la República Mexicana

Ciudad	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud
Coatzacoalcos	18°09'	94°25'	2
Córdoba	18°54'	96°56'	927
Jalapa	19°32'	96°55'	1435
Orizaba	18°51'	97°05'	1284
Veracruz	19°21'	96°08'	2

Tabla 2.5.1 Ciudades importantes del Estado de Veracruz.

intensidad Mercalli	Número de sismos	Años
VIII	1	1855
VII	2	1864, 1967
VI	6	1523, 1711, 1714(2), 1854, 1866
V	4	1619, 1845, 1870, 1949
IV	17	1790, 1795, 1806, 1820, 1845, 1858, 1879, 1882, 1902, 1911, 1920, 1937, 1956, 1957, 1959 (3)
III	34	1606, 1784 (2), 1800, 1801, 1815, 1818, 1837, 1845, 1852, 1858, 1868, 1872, 1879, 1887, 1897, 1902, 1907, 1908, 1909(2), 1910, 1911 (3), 1928 (4), 1931, 1941, 1962 (2), 1966.

Tabla 2.5.2 Sismos registrados en el Estado de Veracruz (8).

Para prevenir los graves efectos de los sismos en las construcciones es importante contar con reglamentos de construcción. En 1988 se publicó el Anteproyecto de Reglamento para el Estado de Veracruz, basado en el Reglamento del D.F., de 1987, en el que se presentan los coeficientes sísmicos de la tabla 2.5.3, para las estructuras del grupo A propone incrementar los coeficientes en un 50 por ciento (22).

	A	B	C
Terreno de baja compresibilidad	0.08	0.16	0.29
Terreno de mediana compresibilidad	0.18	0.36	0.58
Terreno de alta compresibilidad	0.24	0.45	0.72

Tabla 2.5.3 Coeficientes sísmicos para el Estado de Veracruz (22).

2.5.2 Tipo de suelo en el centro histórico de Veracruz

La ciudad y puerto de Veracruz se encuentra en el litoral del Golfo de México, ubicado entre la margen izquierda del río Jamapa y el Golfo de México. La zona en la que se localiza la ciudad morfológicamente se puede dividir en tres subzonas :

- 1) una próxima a la costa, donde afloran depósitos de playa con ligera pendiente al mar,
- 2) otra formada por cordones de dunas litorales con un alineamiento de Norte a Sur,
- 3) una última zona ubicada sobre la margen izquierda del río Jamapa y atrás de los cordones de dunas litorales.

Gran parte de la ciudad está sobre depósitos de playa ubicados entre las dunas y el mar, constituidos por arenas, arenas limosas y arenas con conchas y fósiles, generalmente con pendientes suaves, el agua del suelo presenta el nivel de aguas freáticas cercano a la superficie, entre uno o dos metros aproximadamente.

En un sondeo realizado por la compañía Ingeniería Experimental en una zona del centro histórico, a trece metros de profundidad, entre las calles Independencia y Benito Juárez, se encontró una primera capa de arena en la que encontraron el nivel de aguas freáticas. Después se localizan capas de coral seguidas por otra de conchas fósiles junto con arcilla (20). Es importante realizar estudios para conocer las propiedades del terreno sobre el que se encuentran los edificios históricos de esta ciudad, la información disponible no es suficiente para determinar las propiedades del suelo, especialmente sobre su comportamiento dinámico.

2.5.3 Viento en la ciudad de Veracruz

El viento es una acción accidental de gran importancia en la ciudad de Veracruz, debido a que alcanza velocidades mayores a los 100 Km/h que pueden llegar a dañar las estructuras, especialmente cuando no están diseñadas para resistir su fuerza o se encuentran muy deterioradas. Un elemento bajo la acción del viento puede ser agitado y balanceado, si sus conexiones no son buenas o es muy flexible puede dañarse de manera importante. La fuerza del viento puede producir vibraciones que dependerán de la forma del elemento o estructura, de su periodo fundamental y de la velocidad del viento. El daño puede ser local o total, si el elemento está apoyado en el terreno puede colapsarse o moverse de su posición original (12).

2.6 Estado actual e intervenciones de edificios históricos

Los edificios históricos de la ciudad de Veracruz han tenido cambios importantes, se han introducido nuevos materiales así como diferentes estructuraciones. La mayoría de los que se encuentran en uso, no tienen sus entrepisos originales (foto 2.6.1), sino que han sido sustituidos por losas de concreto reforzado o de vigueta y bovedilla, trabajando a veces junto con vigas de madera y duela, vigas de concreto reforzado o bien vigas de acero que sustituyen algún elemento estructural eliminado. Existe una gran variedad de alteraciones estructurales tanto en muros como en entrepisos. Hasta el momento estos edificios no han tenido problemas bajo cargas gravitacionales, pero algunos de ellos representan un riesgo bajo acciones horizontales.

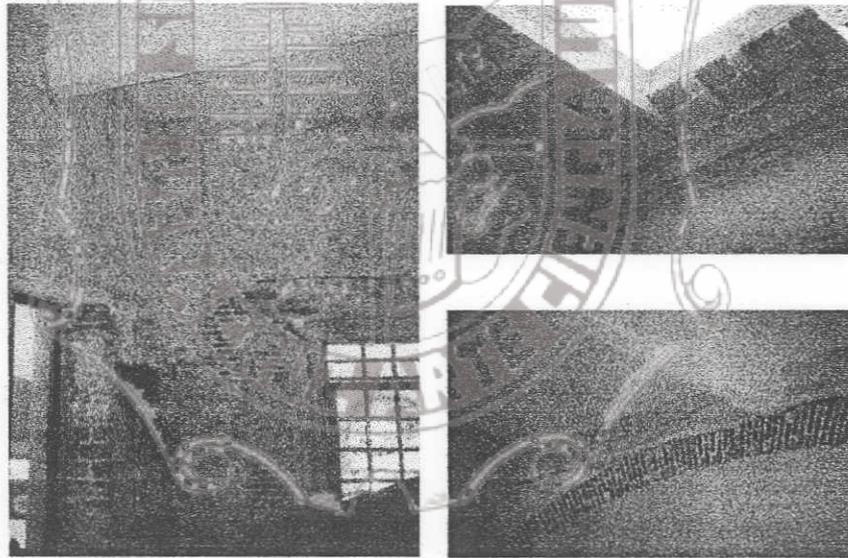


Foto 2.6.1 Modificación de los entrepisos.

Ha variado el uso de los edificios, los que antiguamente eran viviendas ahora son comercios o bodegas. Por adecuaciones, las fachadas de muchos edificios históricos se han transformado, con vanos mucho más grandes que los originales que soportan una masa considerable de los pisos siguientes, la densidad de muros en planta baja es mucho menor que la original, especialmente en edificios de uso comercial y bancario (foto 2.6.2).



Foto 2.6.2. Eliminación de muros en fachadas.

Existen muros de fachada, a los que se adosaron marcos de concreto reforzado en su perímetro pero se observa que no están unidos a otros marcos laterales que hagan trabajar a la estructura como una unidad (foto 2.6.3).



Foto 2.6.3. Marcos y columna adosados a los muros de mampostería.

Muchos edificios se encuentran en ruinas, con sus entrepisos y techos derribados o en mal estado, con vigas de madera flexionadas por el peso que soportan, algunos de estos edificios aún en están habitados. Debido a la disgregación del mortero y al intemperismo se presentan grietas en muros, especialmente los que no cuentan con entrepisos (foto 2.6.4), en ocasiones, sus vanos se encuentran cerrados con tabiques o ladrillos, de manera que forman elementos que pueden ser vulnerables ante la acción del viento, factor importante en la ciudad de Veracruz que alcanza rachas considerables.

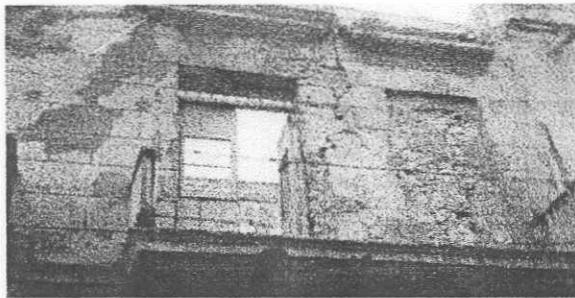


Foto 2.6.4. Muros deteriorados.

Un elemento deteriorado y prácticamente en voladizo, que no permite el paso del viento a través de sus vanos, puede verse dañado bajo esta acción; aunque son elementos masivos, el deterioro que presentan por el intemperismo ha provocado que una parte importante del mortero o de las piezas haya desaparecido, ya que estos muros generalmente no cuentan con recubrimiento (foto 2.6.5).



Foto 2.6.5 Muros y arcos deteriorados

El apéndice B contiene más datos sobre el estado de los edificios y muestra la importancia de reforzar algunos de ellos debido a que representan un riesgo para los usuarios de dichos inmuebles y de quienes transitan cerca de ellos.

CAPÍTULO III

INTERVENCIONES EN MONUMENTOS HISTÓRICOS

3.1 Aspectos fundamentales para intervenir un inmueble

El procedimiento de intervención a un monumento requiere de técnicas especiales y materiales apropiados para cada caso. Las técnicas de restauración pueden ser clasificadas en reversibles e irreversibles (figura 3.1.1), las primeras son técnicas que debido a su ineficiencia o baja durabilidad con el tiempo pueden retirarse sin dañar la obra original, en caso de que se desarrollen mejores técnicas y materiales se pueden reemplazar fácilmente. Sin embargo los métodos reversibles no son siempre aplicables, ya que en muchos casos no puede ser posible resolver un problema simplemente con una técnica reversible, particularmente en el caso de la mampostería donde el restablecimiento de su integridad es de primera importancia.

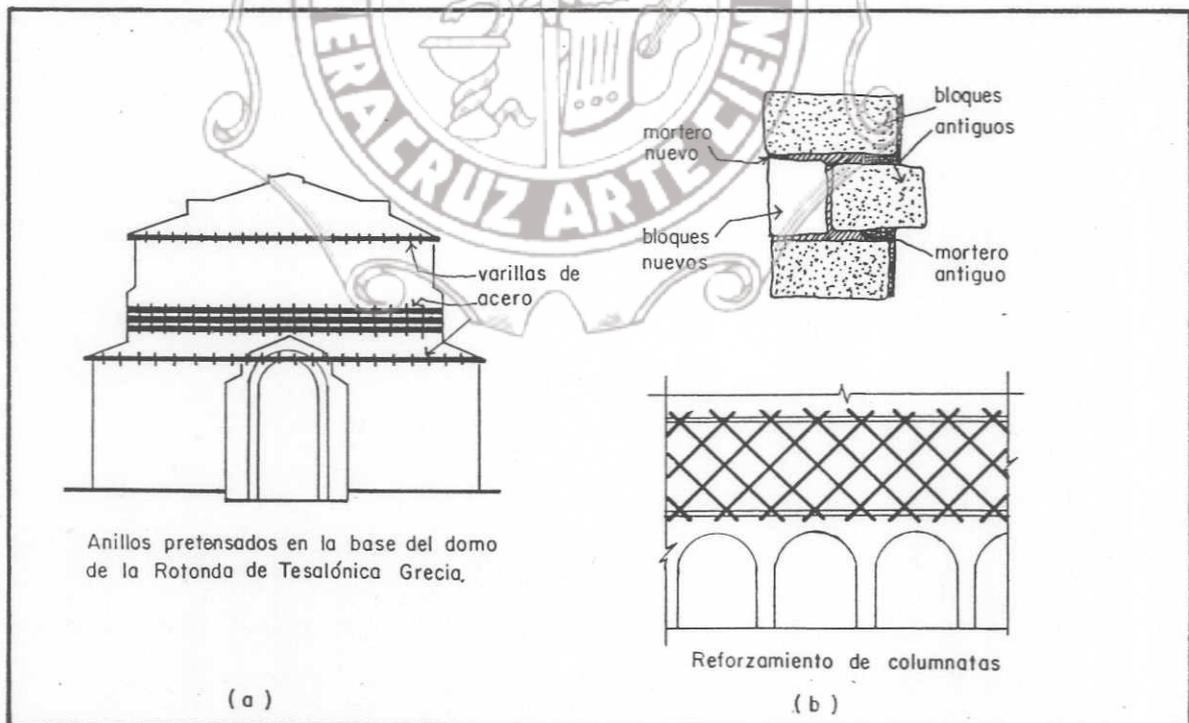


Figura 3.1.1 Técnicas de intervención (a) reversibles e (b) irreversibles en edificios históricos

Algunos ejemplos de técnicas reversibles son: refuerzos en apoyos externos, ataduras en los arranques de los arcos, anillos en la base de domos, mejoría de la resistencia, rigidez y ductilidad de los diafragmas existentes. Las técnicas irreversibles más comunes son: introducción de piezas y morteros nuevos en grietas, reforzamiento de cimentaciones y muros de mampostería mediante barras de acero, etc. Cuando se unen materiales nuevos con materiales antiguos, deben existir dos características básicas: compatibilidad y durabilidad (23).

Compatibilidad: Esta característica compara las propiedades químicas, mineralógicas, físicas y mecánicas de los materiales para reparar y reforzar, con las de los materiales originales. Algunos factores de los materiales referentes a este término son: resistencia, coeficiente de expansión térmica, permeabilidad y eflorescencia de los materiales nuevos.

Durabilidad: El tiempo de vida de los materiales nuevos debe ser al menos igual que el de los materiales originales, también es necesario para la preservación que la compatibilidad entre los materiales permanezca para el mismo periodo de tiempo.

Para la rehabilitación y adecuación de un inmueble se requiere planear cada actividad para obtener los mejores resultados. En primer lugar tenemos las obras preliminares, las cuales se refieren a la limpieza y protección del edificio para facilitar los trabajos posteriores y evitar daños a la construcción. Contamos con las obras de liberación, que consisten en eliminar los elementos adicionados con anterioridad que alteren el aspecto formal, estructural o funcional del inmueble (retiro de muros divisorios, entresijos, techos, rellenos o instalaciones, eliminación de aplanados en mal estado y la liberación de puertas y ventanas).

Son también importantes las obras de limpieza, protección y desinfección para eliminar los deterioros y agentes que los producen, la forma de tratamiento depende de los daños y sus causas. Por otra parte, los trabajos de restitución consisten en sustituir total o parcialmente los elementos perdidos o afectados a través del tiempo si se cuenta con los

datos de sus características originales, o bien, se utilizan sustitutos que restituyan el trabajo desempeñado por el original, sin tratar de igualar o copiar los elementos (11). Por último, las obras de consolidación son necesarias cuando se ha perdido la capacidad de trabajo de una estructura o elemento, en el caso de muros de mampostería, cúpulas o bóvedas se utiliza la inyección de grietas para consolidarlos.

3.2 Criterios para adecuar y reestructurar edificios históricos

La adecuación de un edificio histórico consiste en satisfacer las necesidades de acuerdo al nuevo uso o destino de dicho inmueble, siempre y cuando éstas no afecten el aspecto formal y estructural del edificio.

La reestructuración busca integrar nuevos elementos constructivos proyectados de acuerdo con soluciones técnicas preexistentes en el edificio, las cuales fueron hechas en base a conocimientos y procedimientos diferentes de los actuales, cuya calidad, en algunos casos ya no es la adecuada. De acuerdo con las normas de conservación y restauración de monumentos, como la Carta de Venecia, cuando las técnicas tradicionales son inadecuadas, la consolidación de un monumento puede hacerse mediante técnicas modernas, su eficiencia debe ser probada tanto experimental como científicamente.

Para reestructurar un edificio o monumento se debe contar con un levantamiento detallado en plantas, cortes y elevación de su estructura que señale las fallas, grietas, deformaciones, asentamientos y falta o ausencia de elementos constructivos. En los planos se debe señalar cuáles son los elementos visibles, cuáles fueron explorados y los que fueron supuestos para cada etapa del estudio del proyecto, con el fin de poder sintetizar los cálculos definitivos y tenerlos en la memoria.

Se requiere el diagnóstico de las causas que produjeron las fallas estructurales y la investigación de los medios y sistemas de diseño, su proporcionamiento, cálculo y construcción originales. De esta manera se podrá establecer si la causa fue alguna de las siguientes (15):

- a) falta o escasez de cimientos o de secciones constructivas
- b) mala calidad del material de construcción o transformación de morteros
- c) heterogeneidad de los materiales constructivos
- d) humedad, corrosión o falta de protección a maderas
- e) acción de cargas muertas
- f) edad de la construcción
- g) acción de cargas por sismo o viento
- h) malas intervenciones estructurales

Para una reestructuración se deben comprobar las fallas encontradas, sus causas y la solución que se de para reestructurar mediante cálculos de estabilidad de la construcción, por lo que es indispensable conocer el material y explorar las fallas y deformaciones para poder comprobar los esfuerzos calculados.

Las características de las grandes obras históricas de la arquitectura mencionadas en el capítulo I muestran la importancia de la buena ubicación de los elementos resistentes para que la construcción tenga un buen comportamiento ante fuerzas horizontales, así como la ventaja de utilizarlos a compresión. Es importante conocer porqué se originan los problemas estructurales en un edificio cuando se presentan movimientos sísmicos, con el fin de evitar o reducir los problemas, especialmente si se realizan reparaciones o cambios estructurales en edificios históricos.

3.2.1 Edificios irregulares en el centro histórico de Veracruz

En muchos de los edificios del centro histórico de Veracruz, que han tenido alguna alteración estructural, se observa que no es muy común que al efectuar dichas intervenciones se visualice el comportamiento de la estructura ante cargas horizontales, sino que se ha dado mayor importancia a la acción de cargas verticales, aunque se observa en algunas reparaciones que ni a este aspecto se le dio la importancia debida.

Las estructuras históricas de Veracruz fueron construidas originalmente con formas sencillas y simétricas, pero a través del tiempo tuvieron modificaciones, como la casa de "medio patio" mencionada en el capítulo II. En tiempos más recientes las modificaciones fueron más radicales y actualmente encontramos edificaciones con formas muy variadas y estructuras muy diferentes a las originales, se han realizado cambios importantes a la estructura, aumentando o eliminando elementos estructurales o niveles (figura 3.2.1). Existen edificios que cuentan con muros colocados adecuadamente para resistir fuerzas horizontales en un sentido pero no en el sentido perpendicular a éste.

Piso débil

La estructuración original de los edificios históricos de Veracruz generalmente no presentan este tipo de problemas, sus constructores intuían este principio, pero actualmente se dan casos en que los muros son eliminados en planta baja o en pisos superiores y se presenta esta situación (foto 3.2.1).

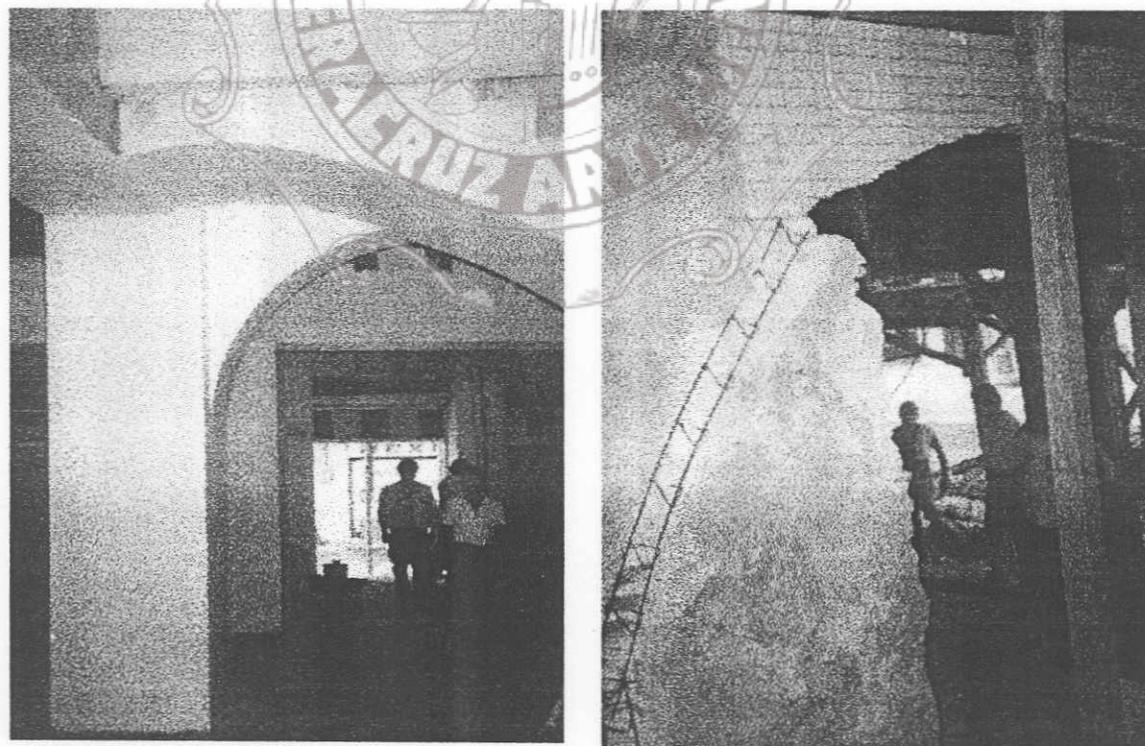


Foto 3.2.1. Muros eliminados y transformados en planta baja.

En edificios históricos, este problema se presenta principalmente cuando han sido intervenidos en su estructura, eliminando los elementos resistentes de la planta baja debido a la necesidad de áreas libres por el cambio de uso del inmueble. Aunque en algunos de ellos se colocaron otros elementos resistentes para sustituir a los eliminados, este cambio no implica necesariamente que su resistencia y rigidez sea la misma, por lo que puede aumentar la posibilidad de torsión durante un sismo.

Debe evitarse el "piso débil", de manera que su resistencia no sea menor que el 80% de la resistencia del piso inmediato superior (13). La resistencia de un piso es la resistencia de todos sus elementos resistentes al sismo que comparten el cortante del piso en la dirección del sismo.

También hay casos en los que probablemente no existan modificaciones de la estructura, pero se observa que es débil para resistir fuerzas horizontales en un sentido debido a que carece de elementos resistentes en esa dirección, mientras que en el sentido ortogonal tiene muros o arquerías que pueden ayudar a resistir dichas acciones (foto 3.2.2).



Foto 3.2.2 Edificios con arquerías paralelas sólo en un sentido.

Irregularidad en el perímetro

Existen edificios históricos aún con su estructura original, pero que presentan cierta irregularidad en su perímetro, como el caso de edificios en esquina. Esta irregularidad se acentúa aún más cuando por la adecuación del edificio, los vanos se hacen más grandes, de modo que dos de sus fachadas se encuentran cerradas y las otras dos tiene aberturas de tamaño considerable.

Es importante evitar este tipo de problemas propiciando que la resistencia y rigidez en el perímetro de la estructura sea aproximadamente igual. Si se van a agregar muros resistentes, es preferible que se encuentren cercanos a los muros que tienen aberturas para que aumente la resistencia y rigidez de estos elementos. Así también es importante evitar una mayor densidad de muros junto a los muros sólidos para que no resulte un problema mayor.

Las esquinas pueden tener problemas, un movimiento en forma diagonal puede esforzarlas más que al resto de la estructura, esto no sucede si el movimiento es a lo largo de los ejes ortogonales. Por lo que se debe atender a las columnas de esquina en marcos o procurar que existan muros sólidos en esquinas, para estructuras a base de muros.

Cambio de rigidez en columnas

Aunque no es común encontrar este problema puede llegar a presentarse debido a que muchos de los edificios históricos cuentan con columnas que soportan arcos y cualquier cambio puede afectar su comportamiento.

Si se rellena una porción de una columna en la remodelación de un edificio, no se está haciendo más resistente a la columna y la estructura en su conjunto, en realidad se está provocando una concentración grave de esfuerzos debido a que una columna corta recibe fuerzas cortantes mayores que una columna larga, puesto que es más rígida que la otra, y puede estar desproporcionada con su resistencia. La adición de elementos no estructurales pueden cambiar el comportamiento dinámico de la estructura por lo que se debe tener cuidado con este aspecto.

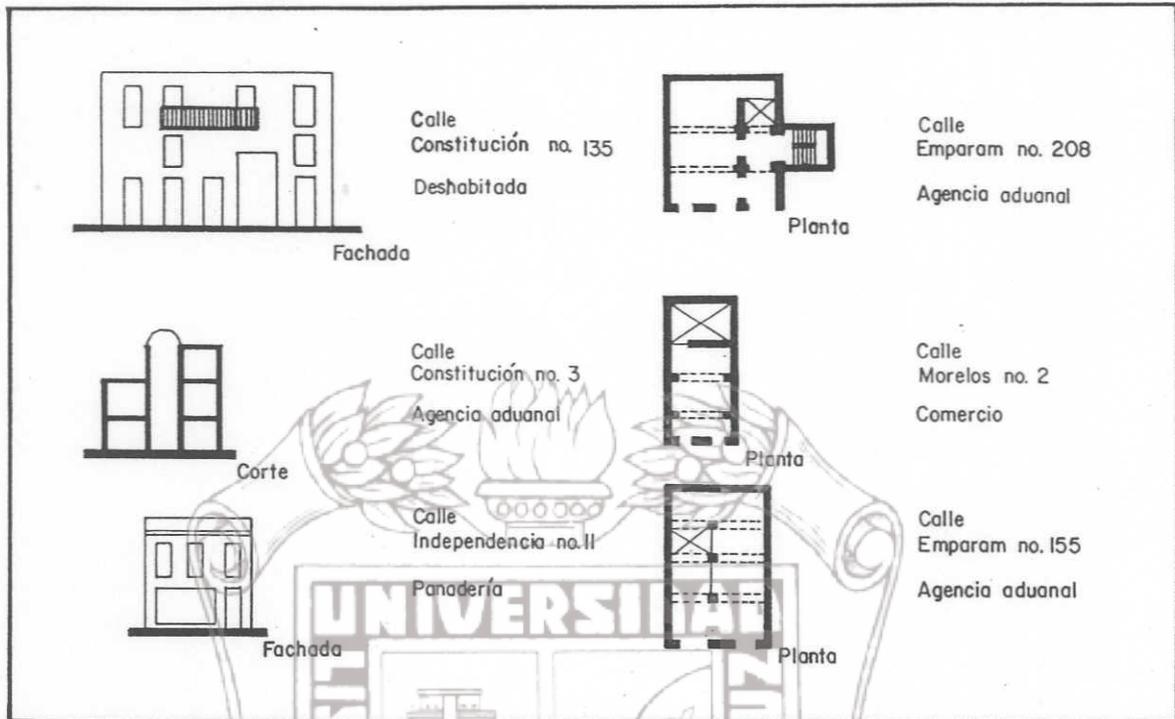


Figura 3.2.1 Ejemplos de edificios irregulares

Esquinas entrantes

Las esquinas entrantes se encuentran en viviendas de uno o más niveles, estas formas pueden producir variaciones de rigidez y provocar concentración local de esfuerzos en la esquina entrante, dependiendo de sus dimensiones pueden originarse fuerzas de torsión. La gravedad de estos problemas dependerá de la masa del edificio, de los sistemas estructurales, de la longitud y altura de las alas y sus relaciones de esbeltez. Los problemas se originan porque, bajo fuerzas horizontales, las alas de un edificio se moverán en distintas formas originando daño en su unión.

Escalonamientos

Hay edificios históricos con escalonamientos, si los muros de cortante son los discontinuos se pueden crear graves problemas para transferir fuerzas a la cimentación, por lo que deben evitarse. Existen casos en los que algunos de sus muros en planta alta no tienen continuidad en los pisos inferiores, lo que resulta un problema de gran importancia que debe repararse.

3.3 Técnicas de intervención

Una estructura antigua puede debilitarse debido a que ha estado sometida a lo largo de su existencia a diversas condiciones de cargas y a las inclemencias del clima, que llevan a la pérdida de resistencia y rigidez de sus elementos estructurales. Es frecuente la incompatibilidad de los materiales originales y de las técnicas actuales utilizadas en intervenciones y reparaciones, por esta razón es importante determinar la condición final de fuerza de la estructura y su habilidad para resistir sismos.

Los factores que influyen en el deterioro de un edificio pueden ser de carácter intrínseco o extrínseco. Los primeros son deterioros que surgen con el paso del tiempo, como la disgregación del material o la falla de éste por fatiga. Algunos factores extrínsecos son la humedad, parásitos, modificaciones, sismos o hundimientos. La solución a un problema estructural dependerá de estos factores.

3.3.1 Cimientos

Hasta el momento no se han presentado problemas de hundimientos diferenciales en edificios del centro histórico de Veracruz, aunque son construcciones de masa considerable su cimentación ha tenido buen comportamiento bajo cargas gravitacionales y el suelo no ha presentado fallas. Se observan grietas en algunos muros de los edificios históricos en estado ruinoso que pueden originarse más bien por la disgregación del material o el derrumbe del sistema de entrepiso.

No se tienen datos de que existan cimentaciones profundas en las construcciones antiguas de Veracruz, pero podría presentarse algún caso que requiera de su ayuda, principalmente cuando existen hundimientos del terreno y se requiere alcanzar los estratos más consistentes, si estos se encuentran a profundidades notables.

El hincado de pilas o pilotes se permite en los monumentos para evitar asentamientos o deformaciones que causen desniveles o desplomes en la construcción, con la condición de que su elaboración se haga mediante procedimientos que no tengan golpes,

vibraciones o impactos, por lo que es preferible hacer una perforación previa y colar en el lugar; sólo para casos particulares se permite el hincado a presión (15). Esto mismo se debe tomar en cuenta para la colocación de una ataguía de frontera entre dos construcciones vecinas.

Algunos problemas en la cimentación de un edificio pueden solucionarse dando un apoyo consistente del suelo mediante la recimentación, la cual es una solución bien aceptada en la restauración de monumentos debido a que se realiza bajo tierra, puede ser desde una inyección de puzolanas o "suelo de cemento" bajo los apoyos minados hasta el uso de pilas o pilotes. Las inyecciones no dan garantías suficientes debido a la imposibilidad de verificar si se ha infiltrado el material inyectado, además de que puede tener consecuencias perjudiciales para las construcciones adyacentes, por lo que debe realizarse bajo una inspección apropiada.

La cimentación que soporta techumbres con bóvedas y arcos debe ser capaz de combatir acciones tanto verticales como horizontales, y cerrar en equilibrio los efectos, una recimentación para este tipo de estructuras se debe proyectar para oponerse integralmente a la acción aislada de cada descarga y a la acción combinada de todas ellas. Es importante comprobar con los cálculos que el centro de carga corresponde al centro de reacciones tanto para cada descarga como para el conjunto de ellas. El aumento de área de cimentación debe combatir además el asentamiento del suelo, de manera que el aumento se proyecte donde las deformaciones o desniveles han sido mayores.

3.3.2 Reestructuración de muros y arcos

En Veracruz los edificios ruinosos con muros sin aplanado que dejan al descubierto la mampostería de sus fachadas, presentan disgregación del material y por consiguiente disminuye su capacidad estructural debido a la insuficiencia de su sección transversal. En monumentos no se recomienda solucionar los desequilibrios en los muros con el aumento

de su sección transversal resistente, debido a que un principio de la restauración es no afectar la integridad de sus parámetros, por lo que es mejor reestructurarlos desde su interior. Los siguiente son algunos ejemplos:

- a) Si el muro está cuarteado y sólo es necesario retacar las fisuras, se puede sellar la grieta e inyectar lechada a presión (apéndice C).

Para la inyección de muros es importante considerar la naturaleza de los corales utilizados en la mampostería de los edificios históricos de Veracruz, debido a que son muy porosos y cuentan con un gran número de cavidades, esto puede ocasionar que la inyección haga que la mampostería sea mucho más pesada, tal vez más rígida y consistente, pero de mucho mayor peso. Por lo que es indispensable realizar estudios de porosidad a las especies coralígenas utilizadas para el mamposteo.

- b) El refuerzo interior de los muros es una técnica muy utilizada en monumentos, por lo general se hace en ambos paramentos, con castillos y cadenas unidos a través del muro en cada cruce. Es importante que este confinamiento se ancle desde los cimientos hasta las techumbres (15).
- c) Cuando la degradación de la estructura es más grave y el edificio se encuentra en malas condiciones, ya sea por una mala intervención anterior o por acciones accidentales puede recurrirse a preparar sobre las dos superficies de mampostería opuestas, armazones en forma de malla, unidas entre ellos mediante varillas transversales (figura 3.3.1). De este modo se obtiene una estructura de revestimiento con capacidad de asumir total o parcialmente la función de soporte de la mampostería preexistente. Antes, es importante apuntalar para liberar de las cargas superiores a los elementos a consolidar.
- d) Otra forma de refuerzo en casos de deterioros importantes es mediante postensados, colocando el acero con barras tensadas.

Los empujes debidos a los arcos, bóvedas o tejados dan una fuerza de empuje horizontal hacia los muros que son su soporte, pueden llevar a que las paredes exteriores se despeguen de los entrepisos. Para impedir esto, se puede recurrir a tirantes metálicos que neutralicen los empujes horizontales aplicándolos en el centro de presiones del arco (figura 3.3.1).

Un caso interesante es el trabajo hecho a la Torre de Pisa, Italia, cuya inclinación ya hace peligrar su estabilidad. El objeto de quienes trabajan en dicho monumento es reducir su inclinación de manera progresiva y con monitoreos, mediante el anclaje de la torre con 31 cables de acero a una estructura provisional de concreto reforzado localizada a 90 metros de ella y en dirección opuesta a su inclinación (figura 3.3.2). Para proteger la mampostería de los cables de acero, se colocaron protecciones adecuadas de metal y madera que transmiten los esfuerzos lo más uniformemente posible.

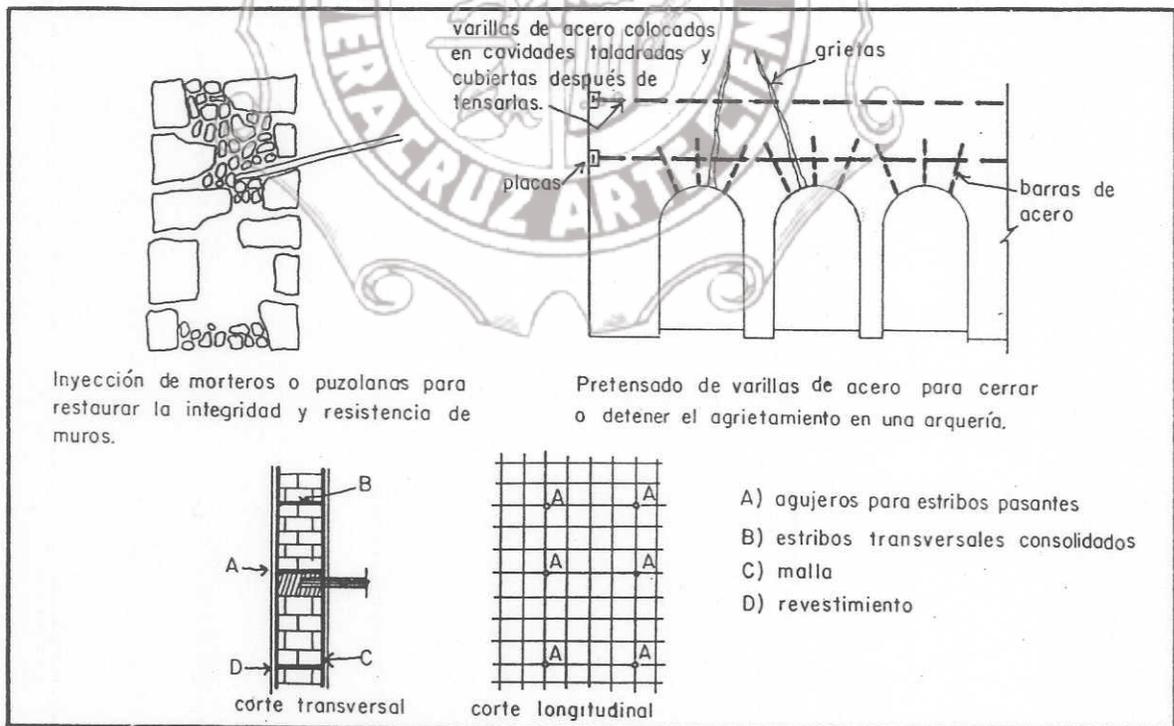


Figura 3.3.1 Intervenciones en muros y arcos

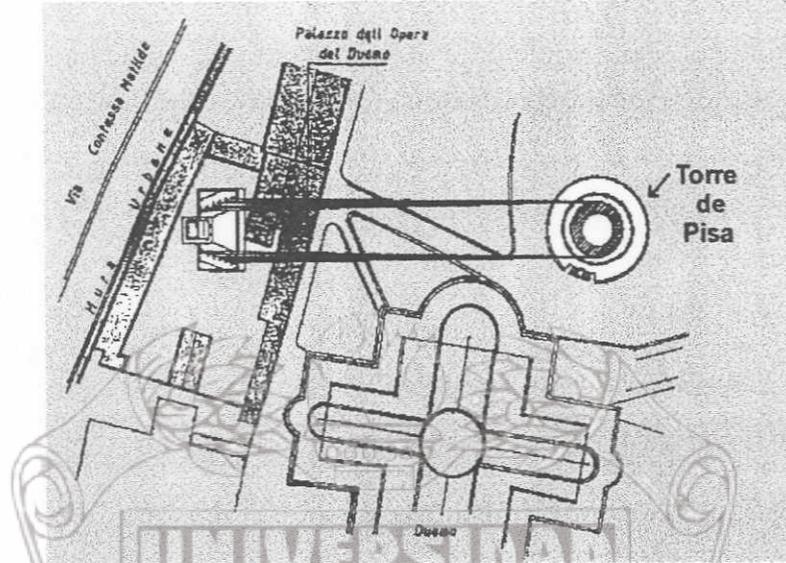


Figura 3.3.2 Planta de la Torre de Pisa y el anclaje a la estructura de concreto.

3.3.3 Sistemas de piso y techo

Todas las piezas que componen las techumbres se deben fijar para que actúen como una unidad, el techo debe actuar como conjunto bajo cargas gravitacionales, como diafragma a empujes sísmicos, y como la combinación de ambos; esto es lo que se llama confinamiento de techumbres. Además de que se debe dar protección a los elementos estructurales contra la humedad y agentes orgánicos higrométricos.

a) Sistemas planos

Para techos y entrepisos planos soportados por vigas de madera o viguetas de acero se debe buscar su conservación, protección (apéndice C), resistencia a cargas gravitacionales y su comportamiento como diafragma en caso de sismo. El contraventeo de techumbres es una solución y puede servir para este fin (figura 1.4.10 d). En techos de bóveda catalana se debe retirar el óxido de las viguetas de acero para conocer sus dimensiones reales y revisar si su sección transversal aún es suficiente.

b) Techumbres curvas

Las cúpulas y bóvedas estructuradas con sillares de piedra o ladrillo se confinan mediante el retacado de cuarteaduras, inyección de lechada y la fijación de uno con otro, de modo que todos los sillares del sistema actúen como una placa o cascarón.

En bóvedas y arcos la línea de presiones a compresión desviada se corrige con eficiencia sólo cuando el problema se deba a las cargas gravitacionales, en este caso resulta efectivo colocar contrafuertes y arcos botareles para sostener los empujes. Pero cuando por un temblor actúan empujes horizontales o por circunstancias locales cede un contrafuerte o un arco botarel, la línea de presiones sale del sistema estructural y provoca flexión y por lo tanto tensiones y esto ocasiona el colapso (ver capítulo I). Por esta razón las mamposterías de las bóvedas se cosen con una malla doble, una exterior y otra interior, ligadas por grapas a través de la bóveda que desempeñen el papel de estribos.

3.3.4 Eliminación de balcones

La eliminación de balcones en los edificios históricos afecta sus características arquitectónicas, pero debido a que no tienen una función estructural, no afecta el buen comportamiento de la estructura. Los balcones son elementos en voladizo independientes del funcionamiento del sistema estructural, no transmiten fuerzas laterales de un muro a otro como el caso de un entrepiso o techo. Es importante su buen mantenimiento debido a que sus materiales componentes son susceptibles de fallar o de que el recubrimiento se desprenda.

CONCLUSIONES

Además de su importancia cultural, los monumentos debido a que generalmente conforman los centros cívicos de las ciudades y sirven como escuelas, museos, bancos o edificios de gobierno, entre otros, una falla estructural puede causar la pérdida de un número elevado de vidas, de pérdidas económicas o archivos públicos, por lo que la gran mayoría se clasifica dentro del grupo de las construcciones de mayor importancia (grupo A, de acuerdo al RDF-93).

En algunos sismos recientes en nuestro país, los monumentos ubicados en zonas próximas a los epicentros han tenido daños considerables, esto muestra la vulnerabilidad ante acciones horizontales de estructuras de mampostería no reforzada, de masa considerable y sin el mantenimiento suficiente. A pesar de que sus elementos resistentes son de grandes espesores se presentan daños por cortante en muros y volcamiento de campanarios, torres y cúpulas de iglesias, por ejemplo. Esto muestra la importancia de reforzar y dar mantenimiento a este tipo de edificios en zonas de riesgo sísmico.

Para la evaluación de un edificio histórico que requiera repararse o adecuarse por cambio de uso, se necesita información relevante que ayude a planear la intervención. Para el centro histórico de Veracruz es importante conocer las características del suelo en esta zona, así como el riesgo sísmico de la región, obtener valores confiables sobre las características de los materiales, especialmente de la mampostería de coral. Las técnicas in situ que utilizan gatos hidráulicos o planos son las más recomendables para conocer su comportamiento al cortante y a compresión, así como sus deformaciones. Los ensayos a gran escala serían los más efectivos, aunque dañan más a la estructura que las pruebas a pequeña escala.

Los siguientes puntos pueden servir de guía para iniciar la evaluación de un edificio histórico de mampostería:

- Definir el tipo de mampostería: la disposición de las unidades y el mortero, sus propiedades mecánicas, la calidad de la mano de obra según la horizontalidad de las

hiladas, el tipo y espesor del mortero, así como la regularidad de las juntas y la calidad del aplanado.

- Grado de deterioro de la estructura
 - Hundimientos
 - Agrietamiento en muros o techos de mampostería
 - Socavación de morteros
 - Derribo de sistemas de piso y/o techo
- Determinar el comportamiento del sistema de piso y techo que soportan los elementos resistentes, si es un diafragma flexible o rígido, si existen concentraciones de esfuerzos por variación del espesor, por aberturas o por formas irregulares en planta o elevación.
- Verificar que la calidad de la unión entre los elementos resistentes horizontales y verticales sea aceptable cuando la estructura se encuentre bajo acciones gravitacionales o accidentales.
- Verificar si sólo la estructura original es la que está actuando o se han sustituido elementos por otros de características diferentes que afecten la resistencia de la estructura.
 - Eliminación de muros estructurales en algún nivel, especialmente en planta baja
 - Eliminación de columnas o arquerías
 - Apertura o aumento de vanos en muros resistentes
 - Marcos de concreto reforzado, sólo en fachadas, sin el adecuado amarre o unión al resto de la estructura.

Es necesario atender las estructuras históricas de la ciudad de Veracruz, contar con un diagnóstico adecuado de la condición actual de dichos edificios, reforzar aquéllos que son vulnerables en su estructura y que pueden provocar daños importantes a las estructuras aledañas y a quienes los habitan. También es necesario contar con lineamientos adecuados que contribuyan a mejorar la calidad de las intervenciones hechas en los edificios antiguos, buscando conservar sus valores culturales y, a la vez, lograr estructuras seguras ante las distintas acciones que puedan presentarse. Y así, preservar el Patrimonio Histórico de la ciudad de Veracruz, importante no sólo para nuestro país, ya que fue la puerta de entrada del continente Europeo al nuestro en aquéllos siglos.

Apéndice A

Condiciones de Regularidad (Normas técnicas complementarias para diseño por sismo del Distrito Federal-1991 y sus comentarios)

1.- Planta sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales por lo que toca a masas, así como a muros y otros elementos resistentes. Con esto se trata de limitar las torsiones, pues cuanto mayor es la torsión tanto mayor es la incertidumbre respecto a los resultados del análisis.

2.- La relación de su altura a la dimensión menor de su base no pasa de 2.5. Conforme crece la esbeltez de un edificio mayores serán los momentos de volteo que este desarrolle y trae problemas de cimentación. Esto implica el aumento en las incertidumbres sobre los resultados del análisis y frecuentemente modos de falla más peligrosos. A mayor esbeltez mayor efecto de las ondas superficiales con componente vertical del movimiento del terreno.

h = altura del edificio

$$\frac{h}{b} \leq 2.5$$

b = base del edificio

3.- La relación de largo a ancho de la base no excede de 2.5. En edificios muy alargados, se pide a los sistemas de piso un funcionamiento eficaz como diafragmas para distribuir las fuerzas horizontales de inercia entre los subsistemas resistentes verticales. La mayor flexibilidad y la menor capacidad de sistemas de piso muy alargados pueden disminuir la eficacia de los subsistemas verticales, aumentan la incertidumbre sobre los resultados del análisis e introduce nuevos modos de falla.

l = largo del edificio

$$\frac{l}{b} \leq 2.5$$

b = ancho del edificio

4.- En planta no tiene entrantes ni salientes cuya dimensión exceda de 20 por ciento de la dimensión de la planta medida paralelamente a la dirección que se considera de la entrante o saliente. Las entrantes o salientes en plantas pueden ocasionar flexiones en los sistemas de piso trabajando como diafragmas horizontales, con lo que se incurre en situaciones semejantes a las de plantas excesivamente alargadas, así como la ineficiencia de la estructura de resistir torsiones. En este tipo de plantas hay concentraciones de esfuerzos en los vértices de las aberturas.

s = entrante o saliente

$$\frac{s}{l} \leq 0.20$$

l = longitud de la planta paralela a s

5.- En cada nivel tiene un sistema de techo o piso rígido y resistente. La escasez de rigidez o resistencia en los diafragmas horizontales puede ocasionar situaciones como las descritas en la tercera condición de regularidad. Por lo que es necesario verificar que la resistencia de tales diafragmas es adecuada y que su rigidez basta para no introducir modificaciones en las fuerzas que según el análisis obran sobre los subsistemas verticales. En caso contrario, se deben modificar la rigidez y la resistencia en el diseño.

6.- No tiene aberturas en sus sistemas de techo o piso cuya dimensión exceda de 20 por ciento de la dimensión en planta medida paralelamente a la dimensión que se considere de la abertura, las áreas huecas no ocasionan asimetrías significativas ni difieren en posición de un piso a otro y el área total de abertura no excede en ningún nivel de 20 por ciento del área de la planta. Los diafragmas con aberturas pueden disminuir la efectividad de los diafragmas horizontales o

introducir excentricidades de difícil cuantificación. Por otra parte, la variación de posición de las aberturas de un piso a otro puede exigir un estado de esfuerzos en los elementos verticales que sea difícil de cuantificar.

$$\begin{aligned}
 d &= \text{longitud de la abertura} & \frac{d}{l} &\leq 0.20 \\
 l &= \text{longitud de la planta paralela a B} \\
 A_h &= \text{área del hueco} & \frac{A_h}{A_t} &\leq 0.20 \\
 A_t &= \text{área total del techo o entrepiso}
 \end{aligned}$$

7.- El peso de cada nivel, incluyendo la carga viva que debe considerarse para diseño sísmico, no es mayor que el piso inmediato inferior ni, excepción hecha del último nivel de la construcción, es menor que 70 por ciento de dicho peso. Las variaciones bruscas de un piso a otro pueden producir cambios en los modos naturales de vibración que invaliden el análisis estático y las aproximaciones comunes en el análisis modal introduciendo incertidumbres en los resultados de los análisis usuales.

$$\begin{aligned}
 W_e &= \text{peso del nivel} \\
 W_i &= \text{peso del piso inmediato inferior} & 0.70W_i &\leq W_e \leq W_i
 \end{aligned}$$

8.- Ningún piso tiene un área, delimitada por los paños exteriores de sus elementos resistentes verticales, mayor que la del piso inmediato inferior, ni menor que el 70 por ciento de ésta. Se exime de éste último requisito únicamente al último piso de la construcción. Se debe evitar la presencia de columnas que, en una dirección o en ambas, trabajen como de doble altura o más, que conduciría a una distribución de momentos flexionantes muy diferente de aquella con que se tiene mayor experiencia, como el caso de mezzanines articulados o los pisos escalonados de algunos estacionamientos.

$$\begin{aligned}
 A_e &= \text{área del piso} \\
 A_i &= \text{área del piso inmediato inferior} & 0.70A_i &\leq A_e \leq A_i
 \end{aligned}$$

9.- Todas las columnas están restringidas en todos los pisos en dos direcciones ortogonales por diafragmas horizontales y por trabes o losas planas.

10.- La rigidez al corte de ningún entrepiso excede en más de 100 por ciento a la del entrepiso inmediatamente inferior.

$$\begin{aligned}
 R_e &= \text{rigidez al corte del entrepiso} \\
 R_i &= \text{rigidez al corte del entrepiso inmediato inferior} & R_e &\leq R_i
 \end{aligned}$$

11.- En ningún entrepiso la excentricidad torsional calculada estáticamente, e , excede de 10 por ciento de dimensión en planta de ese entrepiso medida paralelamente a la excentricidad mencionada.

$$\begin{aligned}
 e &= \text{excentricidad torsional} \\
 b &= \text{longitud en planta paralela a } e & e &\leq 0.10b
 \end{aligned}$$

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

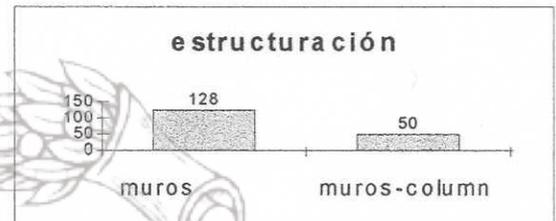
Apéndice B

Levantamiento de la zona de estudio dentro del Centro Histórico de la ciudad de Veracruz.

Zona de estudio: 178 edificios (Monumentos Históricos, Edificios Artísticos y Típicos)

71.91% (128 edificios) construcciones de muros de mampostería.

28.09% (50 edificios) construcciones con muros y columnas de mampostería.



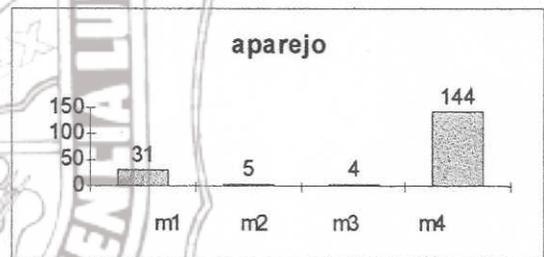
Aparejo visible en 40 edificios:

m1) 77.5%: Piedra "muca" ahogada en mortero.

m2) 12.5%: Piedra "muca" sin labrar acomodada en dos o tres hileras seguida por varias hileras (de dos a siete) de ladrillo.

m3) 10%: Piedra "muca" labrada, aveces intercalada con dos hileras de ladrillo (Visible en las esquinas y jambas de puertas y ventanas).

m4) Aparejo no visible.



De los 50 edificios con columnas:

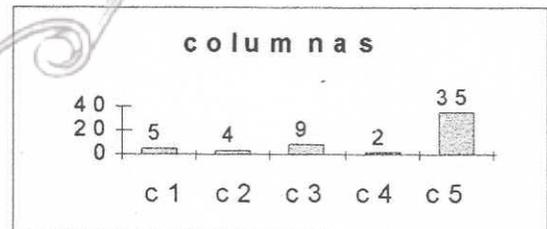
c1) 9.09%: columnas de piedra "muca"

c2) 7.27%: columnas de ladrillo

c3) 16.36%: columnas de concreto reforzado

c4) 3.66%: columnas de acero

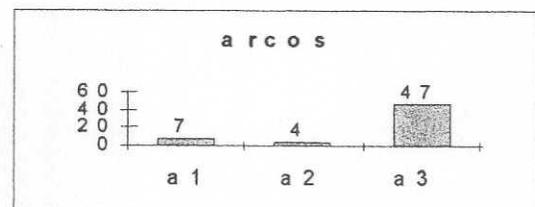
c5) 63.64%: material no visible



a1) Arcos de ladrillo

a2) Arcos de coral

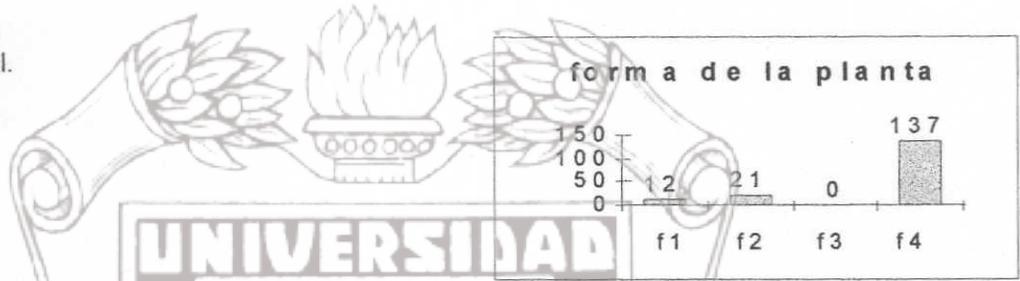
a3) No visible



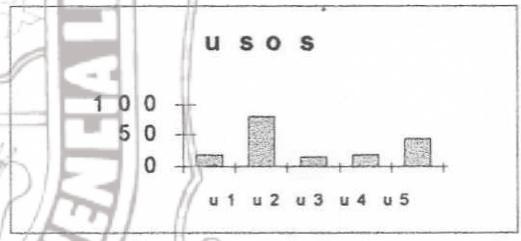
- e1) Terrado
- e2) Bóveda catalana
- e3) Concreto reforzado
- e4) Vigueta y bovedilla
- e5) Vigas de concreto reforzado
- e6) Vigas de acero
- e7) No visible



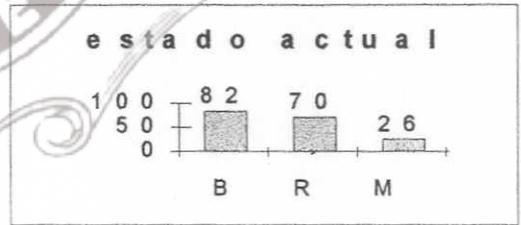
- f1) Medio patio
- f2) Patio central.
- f3) Planta "I"
- f4) Otras



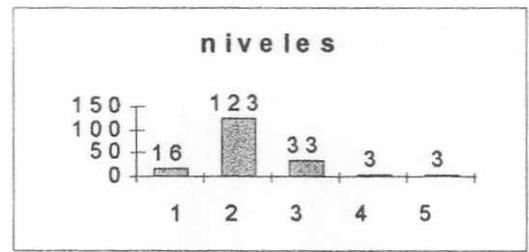
- u1) 10.44%: vivienda
- u2) 45.05%: comercios
- u3) 8.79%: vivienda y comercio
- u4) 10.44%:
- u5) 25.27%: abandonadas



- B) 46.07%: buenas condiciones
- R) 39.33%: estado regular
- M) 14.61%: malas condiciones



- 1) 8.99%: un nivel
- 2) 69.10%: dos niveles
- 3) 18.54%: tres niveles
- 4) cuatro niveles
- 5) cinco niveles.



Apéndice C

1.- Especificaciones para obras de liberación

Retiro de elementos estructurales:

Se establecerá la función que están cumpliendo, se determinará la repercusión que pueda tener su eliminación en la estabilidad del edificio y la forma de sustituirlos por otros que, sin afectar la apariencia original, efectúen el trabajo estructural. La demolición se hará siguiendo el procedimiento y la herramienta que no provoque daños por percusión, caída del producto de la demolición o almacenamiento del material de desperdicio.

2.- Especificaciones para consolidación de materiales en desintegración

De piedra: Serán indispensables los estudios de laboratorio para determinar la causa y la sustancia más adecuada para consolidar. Cuando no exista posibilidad práctica para estos estudios, se consolidarán las superficies pintándolas con una mezcla preparada con cal viva apagada en obra. Se aplicará brocha de ixtle por salpicado; sólo cuando haya endurecido la primera mano se podrá pintar según el procedimiento ordinario.

3.- Especificaciones para consolidar los muros mediante inyecciones en sus grietas

De grietas en muros de ladrillo: Se retirará el material suelto que forma los labios de la grieta y se limpia para quitar todo el polvo. Se lava la ranura y se retaca con mezcla de cal apagada en obra y arena en proporción 1:1 adicionada con 2% de cemento; se rejonea con pedacería de ladrillo. Se incrustan boquillas de tubo de plástico de 12mm de diámetro a cada 30 cm aproximadamente y con la longitud necesaria para igualar el ancho del sillar del paramento y para que sobresalga del paño 20 cm. Fraguado el rejoneo, se inyecta aire a presión por las boquillas, empezando por la que se encuentra en el nivel más bajo. Esta inyección se mantiene hasta que no salga polvo, se repite la operación con agua hasta que escupa y se hace empezando por la boquilla más alta, finalmente se inyecta la lechada y se recomienda la siguiente mezcla:

Cal hidratada = 1 parte
Cemento Portland normal = 2% del volumen de cal
arena cernida = 3 partes
agua = 1.5 partes.

De grietas en muros y en bóvedas de piedra: El procedimiento es el mismo que para las grietas en muros de ladrillo, con algunas diferencias. Después de lavar la ranura se restaña reponiendo la cara del paramento por el cual se trabaja, con material semejante al de fabricación original; cuando el muro tiene su núcleo formado por mezcla terciada de barro, no se inyectará agua, esto se reconoce, si no hay otro dato, por el color del agua que sale al iniciar la inyección, la que debe suspenderse. Después se inyecta la lechada, con la siguiente mezcla:

Cal hidratada = 3 partes
Cemento Portland Puzolana = 1 parte
Arena cernida = 3 partes
Agua limpia = 1.5 partes
Estabilizador de mezclas de cemento en la porción recomendada por el fabricante.

4.- Obras de restabilización estructural

Apoyos aislados o corridos: Se refiere a inyectar o restituir las partes dañadas para que tengan su función estructural original utilizando los mismos materiales y procedimientos constructivos con que fueron realizados.

Elementos sujetos a flexocompresión eventual: Se debe determinar el procedimiento particular que no afecte la volumetría ni al contexto arquitectónico. Es recomendable el sistema de postensado de las mamposterías dejando evidencia de su uso.

Entrepisos construidos con vigas: Se requiere el siguiente procedimiento, retirar rellenos, desinfectar. Proteger e inyectar vigas y tablas; sustituir viguerías y tablas no aptas. Las piezas deben tener la misma escuadría que las originales y se debe conservar la misma distribución y posición, haciendo descansar las cabezas sobre los elementos de repartición de madera igualmente tratada, sin empotrar en la mampostería; nunca se deben impregnar las vigas ni sus cabezas con alquitrán, asfalto y otras sustancias que sellen los poros de madera. Cuando la resistencia estructural del entrepiso sea tal que no pueda seguir en condiciones seguras de servicio, una vez consolidado como se ha descrito, será construida una estructura "portante" sobre el entrepiso para colgar de ella la estructura original; dicha estructura portante debe quedar alojada dentro del espesor del casco original, de modo que no se alteren los niveles originales de acabado superior.



Apéndice D

D.1 Ensaye de Cortante en el sitio

A continuación se describen algunas técnicas útiles para indicar la calidad del mortero de una estructura y pueden servir para cuantificar el deterioro a largo plazo de la resistencia cortante de la mampostería o del daño de la estructura.

La resistencia al cortante de la mampostería puede determinarse extrayendo corazones de grandes diámetros y ensayarlos en máquinas a compresión (figura D-1), pero el espacio cilíndrico que queda es difícil de reparar. Otra opción es extraer secciones de un muro para ensayarse en el laboratorio (figura D-1), lo que resulta un proceso difícil y costoso. En ensayos a gran escala se pueden cargar pilas completas o porciones de muros de cortante en el sitio (figura D-1) para obtener la resistencia al cortante de la mampostería y las propiedades de su deformación.

Por otra parte, las pruebas al cortante o de empuje en el sitio pueden dar información confiable sobre la capacidad al cortante de las juntas de la mampostería, (figura D-1) minimiza el deterioro a la mampostería que será investigada y es la técnica más aceptable para el ensaye al cortante de edificios de mampostería no reforzada. Este índice de resistencia puede usarse para predecir la resistencia al cortante del conjunto total de la mampostería estructural únicamente a través del uso de relaciones derivadas empíricamente.

D.1.1 Antecedentes

La mampostería antigua se caracteriza por tener unidades fuertes unidas con morteros débiles de cal, generalmente se propagan grietas diagonales a través de las juntas del mortero (figura D-2). En las mamposterías modernas hechas con morteros fuertes de cemento o reforzadas y rellenas interiormente con morteros, las grietas se propagarán completamente a través de las unidades en dirección diagonal (figura D-2).

La resistencia al cortante de la mampostería es un tema complicado y aún no está totalmente comprendido, existe un estado de esfuerzos complejo antes de la formación de grietas por cortante que consiste en una combinación de esfuerzos normales no uniformes de compresión o tensión, con el desarrollo de grietas, además de esfuerzos cortantes a lo largo de la grieta. De aquí que el comportamiento por cortante es difícil de medir si no se recurre a pruebas en gran escala. Los ensayos a pequeña escala dan poca información y son aplicables únicamente cuando éstos han sido correlacionados con la respuesta de la mampostería a gran escala.

D.1.2 Ensaye de empuje en el sitio

Para el ensaye de empuje en el sitio se utilizan relaciones empíricas entre la capacidad cortante en el plano del elemento estructural de mampostería y la capacidad al cortante tomada en el sitio y medida por el desplazamiento horizontal de un bloque o ladrillo. Este valor está modificado por varios factores que toman en cuenta la variación de la mano de obra, la contribución del mortero en el cuello de las juntas para medir la carga de cortante y el efecto de los esfuerzos normales en las juntas ensayadas.

Esta prueba se realiza fácilmente, se necesita retirar una unidad de la mampostería y una de las juntas cabeceras verticales de los lados opuestos de la unidad de ensaye elegida (figura D-3 a). La

unidad de ensaye es desplazada horizontalmente usando un cilindro hidráulico o un pequeño gato plano, de esta manera se determina la calidad del mortero y su cohesión interna. Esta prueba no da un valor absoluto de diseño para la resistencia al cortante de la mampostería, sino que los resultados se deben relacionar mediante relaciones empíricas que den una base para la resistencia al cortante de diseño.

Por lo general la capacidad a la tensión de las juntas cabeceras verticales es muy pequeña en estructuras antiguas, por lo que la resistencia principal para la falla por cortante está dada por las juntas horizontales. La resistencia cortante de pilas y columnas angostas y altas fallan por flexión debido a las acciones dinámicas y no puede predecirse usando este tipo de prueba.

El ensaye de cortante en el sitio se utiliza, por lo tanto, para determinar un valor experimental relacionado con la calidad del mortero y con su cohesión interna. Este valor está relacionado con la fuerza cortante de falla de la mampostería usando un fórmula derivada empíricamente.

D.1.2.1 Equipo

- Taladro y brocas para mampostería para retirar el mortero
- Cinceles de mano y martillo
- Gato hidráulico calibrado o gato plano
- Manómetro (medidor de presión)
- Bomba de mano
- Placas de acero de 1/2" de espesor
- Soporte esférico para el asiento en el bloque, con diámetro de 2"
- Calzas de metal
- Protección para ojos y cara

El transductor (aparato que transfiere potencia) de presión electrónico puede sustituir al calibrador de presión para medir las cargas aplicadas. Este último es conveniente por ser un medio seguro para medir desplazamientos unitarios. El reloj del calibrador o los transductores del desplazamiento electrónicos pueden montarse en la unidad de ensaye para este propósito. El uso de equipo electrónico requiere de un aparato para leer los datos adquiridos y una computadora portátil.

D.1.2.2 Procedimiento

El método sigue las recomendaciones del código UCBC (Uniform Code for Building Conservation), de acuerdo a este código se requiere como mínimo un ensaye por 1500 pies cuadrados de superficie del muro y dos ensayos por muro o alineación de muros, además de conocer su historia de principio a fin. En cualquier caso el número total de pruebas por estructura deberá ser mayor que 8.

La ubicación del ensaye debe representar cualquier variación de la calidad del material, mano de obra, exposición a la intemperie y deterioro. Se deben evitar áreas:

- con juntas horizontales que no sean paralelas, ya que esto puede llevar erróneamente a grandes resistencias debido a que se tienen que poner cuñas en el ladrillo ensayado,
- con unidades agrietadas o rotas,
- débiles que puedan fallar anticipadamente,
- adyacentes a extremos de muros o aberturas.

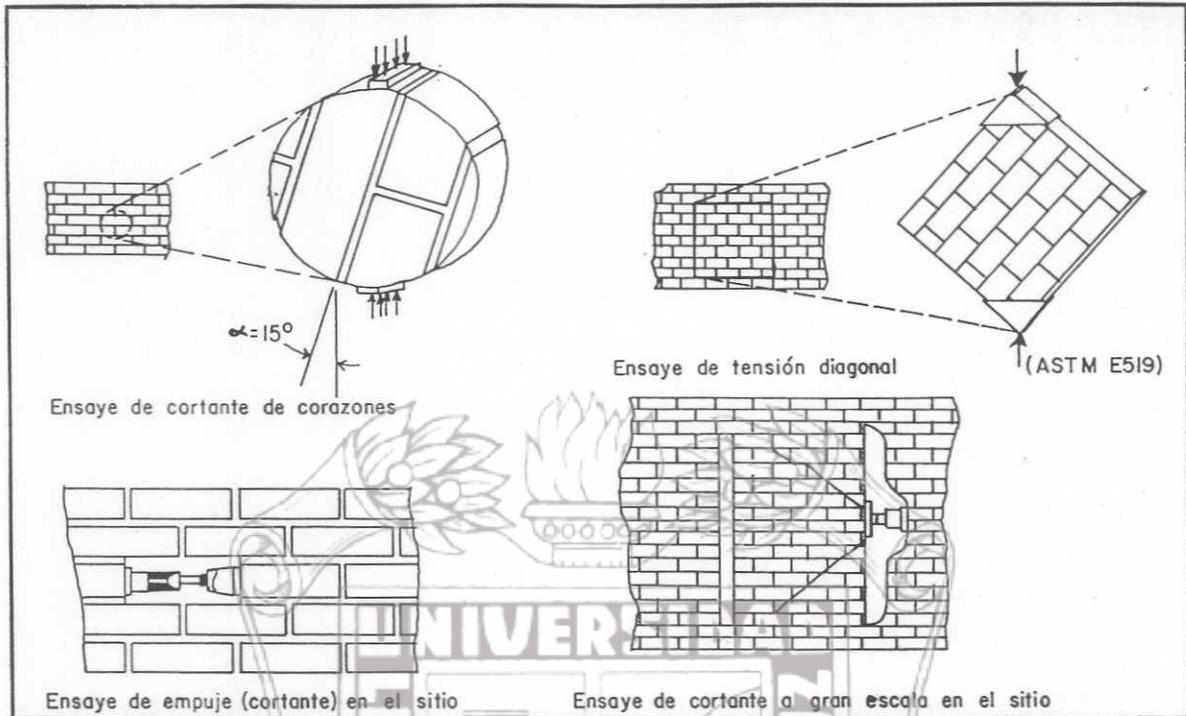


Figura D-1 Ensayos destructivos y ensayos en el sitio para determinar la resistencia cortante en mampostería.

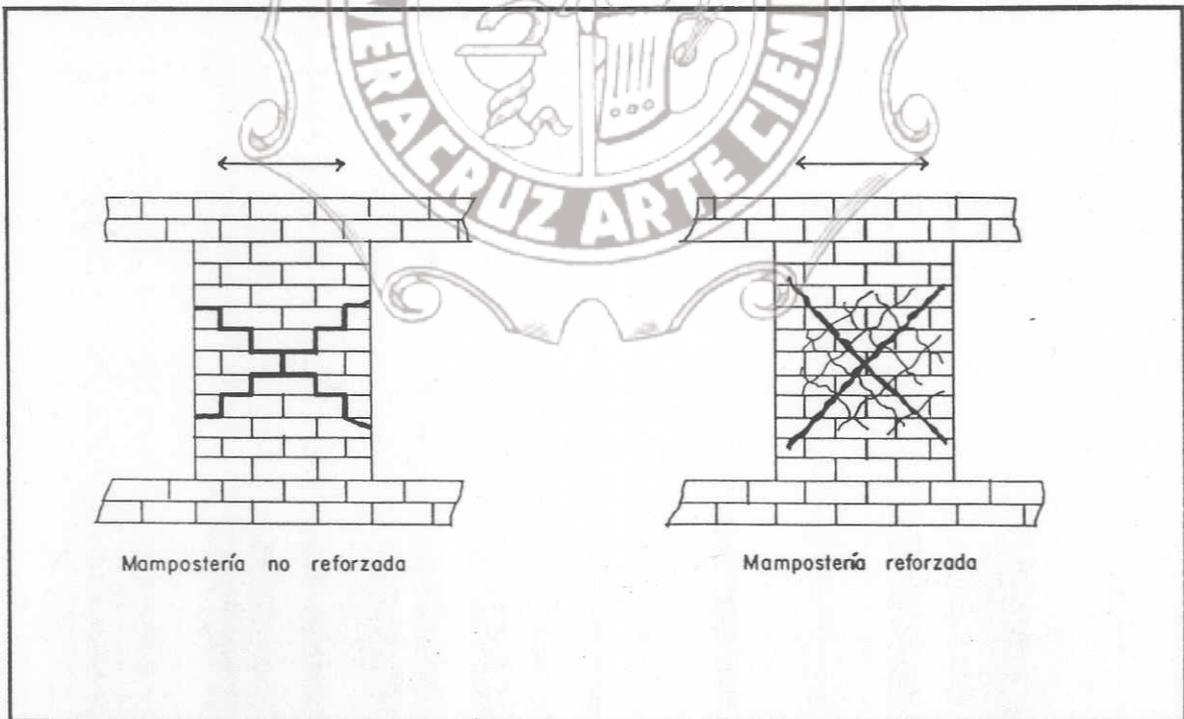


Figura D-2 Desarrollo del agrietamiento en mamposterías reforzadas y no reforzadas bajo cargas en su plano.

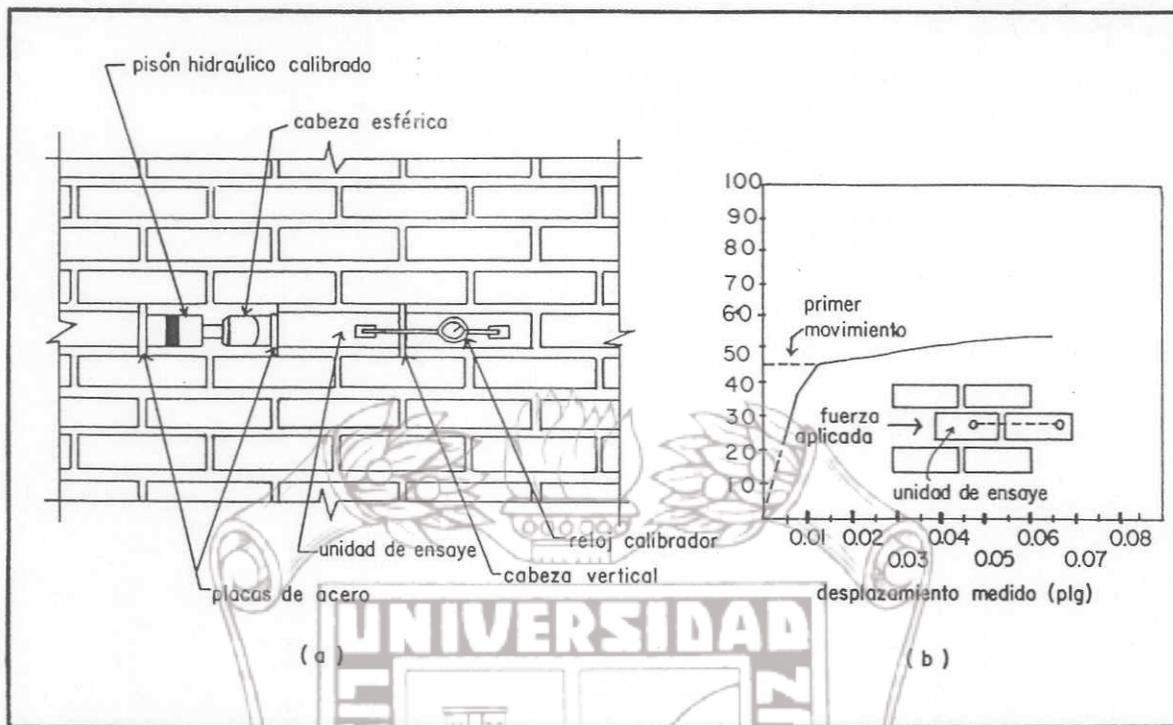


Figura D-3 (a) Ensayo de empuje en el sitio, (b) Curva carga-desplazamiento típica obtenida en un ensayo de empuje en el sitio.

Primero se retira una unidad adyacente a la unidad de ensaye para colocar el cilindro hidráulico de carga. El mortero puede retirarse fácilmente traslapando cavidades (perforación por puntos) utilizando una broca para mampostería con diámetro ligeramente menor que el espesor de la junta del mortero. Se conserva la unidad retirada para colocarla en el muro después del ensayo.

Se debe eliminar toda la junta cabecera del mortero de ambos lados de la unidad de ensaye (figura D-3a), para permitir el libre movimiento en las superficies superior e inferior de las dos juntas horizontales y también se elimina la junta cabecera del lado opuesto de la unidad. Se miden y se registran las dimensiones de las juntas horizontales tanto la superior como la inferior. También se recomienda medir la junta del mortero detrás de la unidad ensayada, ya que esta área del mortero también contribuye a la resistencia de la carga inicial.

Se introduce un cilindro hidráulico dentro del espacio vacío y se calza, en la zona central de la carga aplicada a la unidad, con una placa de acero de $\frac{1}{2}$ " de espesor entre el gato y la unidad de ensaye. El tamaño de la placa de acero debe ser ligeramente menor que el de la cara cargada y debe colocarse de manera que no se cargue ninguna de las juntas del mortero. Si se coloca una pequeña esfera ajustándola al bloque entre el gato de carga y la unidad de ensaye, se obtiene una mejoría de la prueba cuando las superficies de apoyo del gato están ligeramente desalineadas.

Para cargar la unidad de ensaye también puede utilizarse un pequeño gato plano introducido dentro del espacio que dejó la junta cabecera, puede ser del mismo tamaño o ligeramente menor que la dimensión de la unidad típica de mampostería. El gato se coloca dentro de la junta cabecera como se ve en la figura D-4a y se presuriza hidráulicamente. Este método requiere poco trabajo, no se quita la unidad de ensaye entera, sólo se elimina una cabeza de junta, la reparación posterior es menor y da una carga uniforme en el ladrillo ensayado. Pero no es posible determinar el alcance del mortero en el cuello de la junta como requiere el UCBC porque no se retira la unidad

completa de mampostería, además, los gatos planos tienen un rango de deformación limitado y puede resultar caro hacer diferentes gatos para cada medida de las unidades.

En este método se registra la "carga del primer movimiento" de la unidad ensayada como la carga de falla, debido a la indicación de un movimiento relativo asociado con la falla cortante de las juntas horizontales. El "primer movimiento" de la unidad de ensaye es muy difícil de definir y sería una ventaja anexar un reloj calibrador o un transductor de desplazamientos electrónico para monitorear los desplazamientos de la unidad de ensaye (figura D-3a). Las cargas se aplican gradualmente, a una razón tal que la falla de las juntas ocurra de 1 a 3 minutos después del inicio de la secuencia de carga.

Cuando la carga continúa incrementándose y se desplaza la unidad de ensaye (figura D-3b) la dilatación del mortero dentro de las juntas, seguida por la falla, tiene el efecto de incrementar ligeramente el esfuerzo normal de la junta, así artificialmente se provoca un incremento en la resistencia al cortante de la junta. En tales casos es conveniente usar la carga en la cual hay una interrupción en la pendiente de la curva carga-desplazamiento llamada carga "de primer movimiento" (figura D-3b).

Si no está disponible la instrumentación para medir el desplazamiento, se coloca un dedo al lado de la junta que se encuentra cortada, se puede percibir un movimiento de alrededor de 0.001 plg (.00254 cm), indicando el cortante de la junta de mortero. Esta medida es aceptable en las "Definiciones de los Términos referentes a los Métodos de ensayos Mecánicos" de ASTM E6 para ensayos de cortante.

La magnitud de los esfuerzos normales en la junta ensayada tiene un efecto directo en la resistencia a los movimientos. Esto hace necesario determinar el estado de esfuerzos verticales a compresión en la ubicación del ensaye suponiendo las cargas muertas y vivas comunes, o mediante la técnica con gatos planos (ver D.2).

Después del ensaye se coloca nuevamente en su lugar la unidad retirada para restaurar el muro a su apariencia original. Generalmente es conveniente utilizar el taladro para reemplazar el mortero que falló durante el ensaye y que se encuentra alrededor de la unidad de ensaye.

D.1.2.3 Análisis de los resultados de ensaye

La carga registrada en un movimiento relativo asociado con la falla de la junta horizontal es útil como un indicador de la calidad relativa del mortero. Este valor también puede servir para estimar la resistencia al cortante de la mampostería utilizando relaciones empíricas que relacionen la resistencia cortante de una unidad con la resistencia cortante de los muros de mampostería no reforzada sujetos a cargas laterales. La resistencia al cortante de la junta horizontal ensayada se calcula como sigue:

$$v_{test} = \frac{P}{A_1} \left\{ \begin{array}{l} v_{test} = \text{resistencia al cortante de la junta horizontal ensayada} \\ P = \text{carga aplicada en el "primer movimiento" de la unidad de ensaye} \dots \dots \dots D.1 \\ A_1 = \text{área total de las juntas ensayadas superior e inferior} \end{array} \right.$$

El procedimiento general de análisis se describe en la "Metodología para mitigar el riesgo sísmico en edificios existentes de Mampostería no Reforzada" (ABK). La metodología reduce la magnitud

de la resistencia cortante de la junta horizontal con la resistencia cortante con esfuerzo normal cero, v_{t0} , mediante la relación de Mohor-Coulomb:

$$v_{t0} = v_{test} - \phi \frac{P}{A}$$

}

v_{t0} = resistencia cortante con esfuerzo normal cero

v_{test} = resistencia al cortante de la junta horizontal ensayada

A = área promedio de las juntas superior e inferior

ϕ = coeficiente de fricción (1.0)

D.2

Esta relación considera la resistencia cortante medida como el valor de la cohesión del mortero, que se presenta cuando el esfuerzo normal es cero, con una componente fraccionaria que depende de la magnitud del esfuerzo normal de compresión para las juntas horizontales ensayadas. El término P/A representa el esfuerzo vertical debido a cualquier carga viva y muerta en el lugar en que se realiza el ensaye.

La resistencia cortante v_{t0} se determina en cada ensaye individual. De estos valores se determina un cortante básico de la junta horizontal v_t como la vigésima parte de los valores de los ensayos, es decir, el valor más grande del 80% de los valores ensayados. Este es el valor de la resistencia cortante v_t para las juntas horizontales ensayadas que sirve para determinar los esfuerzos cortantes admisibles de mampostería no reforzada. El código UCBC requiere que el mortero con un 20% de la resistencia cortante, v_t , menor que 30 psi se realice nuevamente con un nuevo mortero y se vuelva a ensayar.

En varios códigos de diseño se recomiendan diferentes niveles de valores de esfuerzos cortantes admisibles; la formulación que se describe a continuación se refiere a la misma aproximación básica que contienen todos estos reglamentos. El esfuerzo cortante admisible v_a se calcula como:

$$v_a = k \left(r v_t + \phi \frac{P}{A} \right)$$

}

v_a = esfuerzo cortante admisible

k = coeficiente derivado empíricamente

r = factor de reducción

v_t = vigésima parte de la resistencia cortante básica en la junta horizontal

ϕ = factor de fricción

P/A = esfuerzo axial existente

D.3

La constante k ajusta la cortante medida en la junta horizontal con la resistencia cortante de toda la pieza considerando la variabilidad por el trabajo de mano de obra; el factor de reducción r ajusta los valores del ensaye, debido a la intervención del cuello de la junta, con la resistencia cortante medida de la junta horizontal; ϕ , es un factor que toma en cuenta los incrementos en la resistencia cortante en la pila debidos al esfuerzo axial P/A que actúa en forma normal a la superficie cortante. Ensayes a gran escala de pilas de mampostería realizados para el desarrollo de la Metodología ABK se han correlacionado con ensayos de cortante en el sitio para determinar los valores apropiados de k , r y ϕ . Esa metodología recomienda $k=0.75$, $r=0.75$ y $\phi=1.0$, que resulta:

$$v_a = 0.75 \left(0.75 v_t + \frac{P}{A} \right)$$

Para el código UBC el esfuerzo cortante admisible se determina con:

$$v_a = 0.1v_t + 0.15 \frac{P_d}{A}$$

esta expresión es similar a la fórmula ABK pero para el cálculo de los esfuerzos verticales, considera únicamente la carga muerta permanente, y el esfuerzo cortante admisible no puede ser mayor que 100 psi.

En algunos casos, este tipo de ensayos pueden sobrestimar la resistencia cortante del muro sobre el 30%. También pueden esperarse grandes variaciones en los valores del ensaye, incluso para los ensayos realizados en un área inmediata. Algunos errores en los valores pueden atribuirse a la heterogeneidad, común en las construcciones de la mampostería; también las suposiciones simplificadoras propias del ensaye ayudan a incrementar la variabilidad en los resultados del ensaye.

D.1.3 Ensaye de empuje en el sitio con gatos planos para controlar el esfuerzo vertical

Los ensayos con gatos planos junto con los ensayos de cortante en el sitio pueden usarse para controlar el esfuerzo normal en la unidad de ensaye (figura D-4a), con esto se reducen las incertidumbres debidas a los esfuerzos verticales existentes y proporciona un método para determinar la relación entre el esfuerzo normal de la junta y la resistencia cortante de la junta.

El uso de gatos planos asegura que el esfuerzo normal permanezca constante a lo largo del ensaye de cortante. Como se había mencionado en el inciso anterior, el cortante medido tiene un incremento artificial debido a que la dilatación de las juntas y su restricción por la mampostería circundante hacen que el esfuerzo normal de la junta aumente ligeramente. Si se mantiene la presión del gato plano a un nivel constante durante el ensaye, entonces la dilatación de la junta ocurrirá mientras se conserva a una intensidad constante el esfuerzo normal en la junta.

El método de ensaye estándar del código UBC requiere reducir la resistencia cortante de la junta horizontal de ensaye para que la resistencia cortante se presente cerca de las juntas horizontales con esfuerzo normal a compresión de cero basándose en el criterio Mohr-Coulomb (ecuación D-2).

El coeficiente de fricción, ϕ , de la ecuación D-2 es igual a uno para mamposterías de Los Angeles, Cal. Se ha demostrado por ensayos de laboratorio que el coeficiente de fricción para morteros de mamposterías puede variar de 0.37 a 1.15, con un valor promedio de aproximadamente 0.7, por lo que puede ser necesario determinar el coeficiente de fricción para mamposterías diferentes a las ensayadas por el estudio de ABK en Los Angeles.

Con los gatos planos se controla el esfuerzo normal en la junta y se puede determinar rápidamente el coeficiente de fricción en varios puntos de la estructura que será investigada. El ensaye de empuje puede entonces realizarse a través del resto de la estructura y la reducción de datos se desarrolla utilizando el coeficiente de fricción, determinado experimentalmente, con la ecuación anterior.

D.1.3.1 Equipo

Se utiliza todo el equipo básico necesario para el ensaye de empuje descrito anteriormente, los gatos planos deben tener dimensiones apropiadas para que se ajusten en la junta cabecera en la que se aplicarán las cargas cortantes. Los requisitos del equipo, la instalación y el uso de gatos planos sigue al procedimiento bosquejado en el punto D.2 sobre ensayes con gatos planos. La principal diferencia es que se requieren dos bombas hidráulicas: una para mantener la presión del gato plano y la otra para controlar la carga horizontal del gato plano. Se conectan en paralelo los dos gatos planos para aplicar el esfuerzo vertical con una presión igual todo el tiempo.

D.1.3.2 Procedimiento

Se instala el equipo de ensaye de acuerdo a la figura D-4a con dos gatos planos paralelos separados por cinco hiladas de la mampostería, la unidad a ensayarse se ubicará a la mitad de la distancia entre los gatos planos. Se retiran únicamente dos juntas cabeceras, una en cada lado de la unidad de ensaye, se aplica presión en los gatos planos arriba y abajo de dicha unidad para asegurar una distribución uniforme de los esfuerzos verticales en de la unidad de ensaye. La técnica anterior de retirar un ladrillo entero e insertar el dispositivo de carga puede tener un efecto significativo en los esfuerzos verticales, y puede llevar a concentraciones de esfuerzos y a una distribución de esfuerzos verticales no uniformes a lo largo de las juntas ensayadas.

El ciclo inicial de carga se realiza con una presión de cero en los gatos planos para el esfuerzo vertical, con incrementos de presión del gato plano en la junta cabecera. Se registra la carga del "primer movimiento" en la unidad de ensaye que proporciona la resistencia cortante base V_{t0} que se presenta cuando el esfuerzo normal es cero en las juntas ensayadas. Después se incrementa la presión en los gatos para el esfuerzo vertical y se carga la unidad de ensaye hasta que esta comienza a moverse. Se repite la secuencia de carga para varios incrementos del esfuerzo normal creciente (figura D-4b). Se requieren varios incrementos de 25 a 50 psi del esfuerzo normal para describir con precisión la superficie de falla en la junta con el fin de determinar el coeficiente de fricción. Si se desea, el gato puede retirarse y colocarse en el hueco del lado opuesto a la unidad ensayada para realizar un ensaye de empuje cíclico.

Al terminar las secuencias de carga el equipo se retira del lugar, las unidades de mampostería retiradas se colocan en su lugar y las ranuras que dejaron los gatos planos se resanan con un mortero similar en color y composición al original.

D.1.3.3 Análisis de los resultados del ensaye

El esfuerzo de falla en la junta se calcula como se describió en el inciso (D.1.2.3). La resistencia cortante de la junta horizontal con esfuerzo normal cero se determina con la carga de falla en la secuencia inicial de carga (donde la presión del gato para los esfuerzos verticales es cero) y se utiliza para determinar los valores del esfuerzo cortante de diseño como se describió en la sección previa.

La superficie de falla de Mohr-Coulomb se puede determinar graficando la falla cortante de la junta para cada nivel del esfuerzo normal como se muestra en la figura D-5. Una opción para ajustar los puntos de los datos es mediante regresión lineal, que proporciona la superficie de falla; la inclinación de esta línea es el coeficiente de fricción μ .

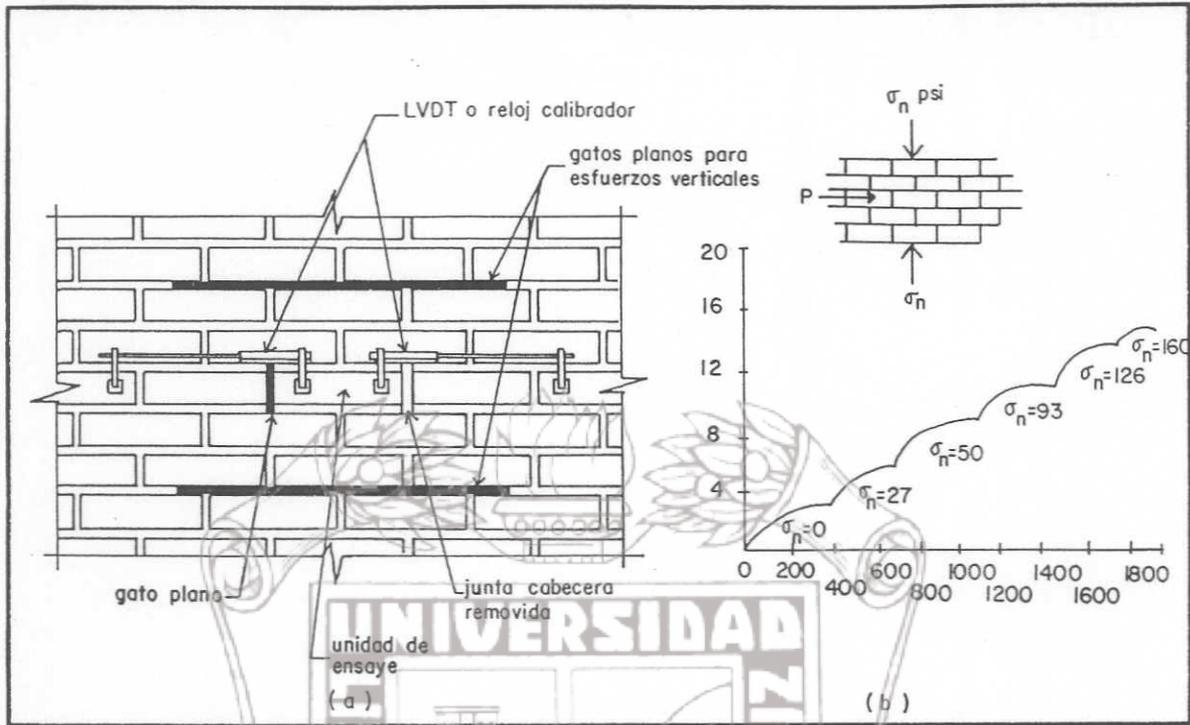


Figura D-4 Ensayo modificado de cortante en el sitio, los gatitos planos controlan los esfuerzos normales en las juntas, (b) curva carga-desplazamiento obtenidas de un ensayo de cortante en el sitio modificado con incrementos en los esfuerzos normales.

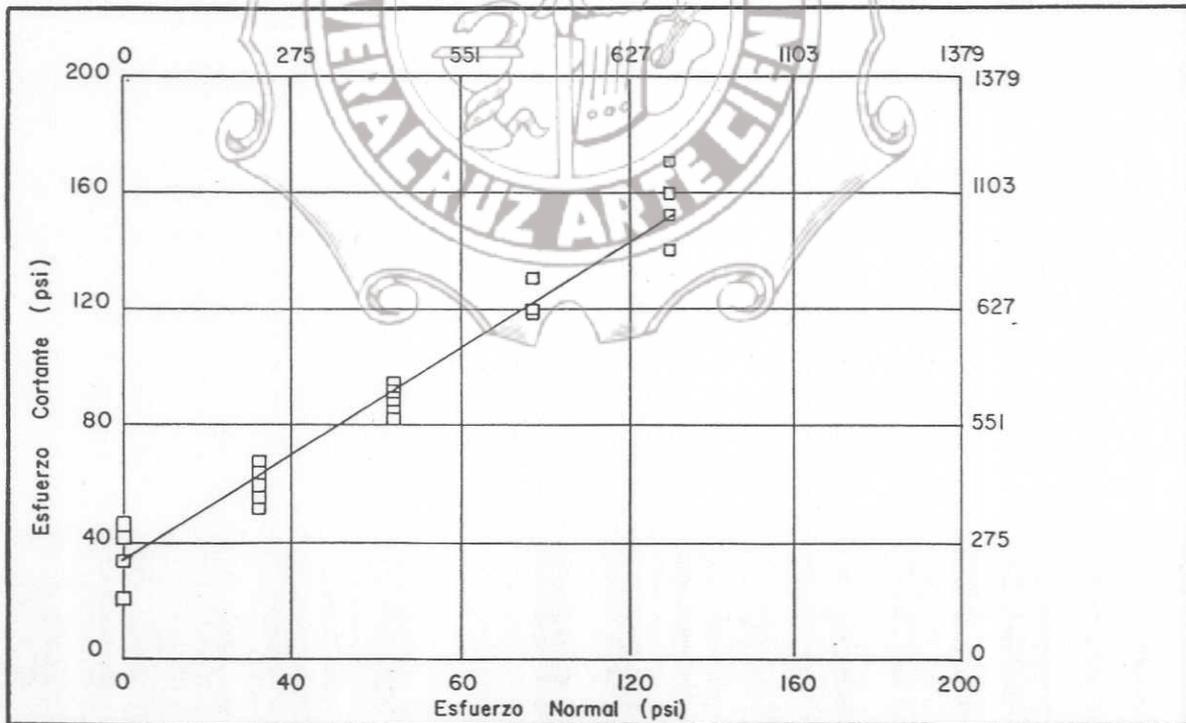


Figura D-5 Superficie de falla Mohr-Coulomb para una junta de mortero obtenida en un ensayo modificado de cortante en el sitio. La pendiente de la línea es el ángulo de fricción ϕ .

En una investigación común el coeficiente de fricción μ se define para varias ubicaciones del ensaye y se determina un valor promedio representativo para cada combinación del tipo de mortero y de las unidades presentes en la estructura. Para ensayos posteriores, en los análisis de datos realizados sin el uso de gatos planos se puede utilizar este valor para el coeficiente de fricción en la ecuación D.3.

Con este ensaye se cuenta con dos aspectos que pueden contribuir a la variación de la medida en la calidad del mortero: la magnitud del esfuerzo normal y el coeficiente de fricción μ . La medida directa de estos valores aumenta la confiabilidad de los resultados ensayados.

D.1.4 Ensaye diametral de corazones

Para la determinación de la resistencia cortante se han utilizado corazones de gran diámetro extraídos de mampostería existente. Esta técnica es la más eficiente para la mampostería moderna y para estructuras con morteros relativamente de alta resistencia donde los ensayos de cortante in situ no son factibles o apropiados. En mamposterías antiguas con morteros débiles de cal es difícil quitar los corazones intactos, por lo que es mejor usar el ensaye de empuje descrito anteriormente.

D.1.5 Ensayes de carga cortante en el sitio

En muchos casos el ensaye de empuje y el ensaye de corazones no dan suficiente información sobre el comportamiento al cortante de la mampostería. El problema principal en los ensayos a pequeña escala es que sus resultados son difíciles de extrapolar con la capacidad cortante de toda la mampostería. Las pilas de mampostería y los muros de cortante sujetos a cargas laterales están bajo una combinación complicada de esfuerzos de cortante, tanto de tensión como de compresión no uniformes, la cual no puede ser modelada adecuadamente con el ensaye de unidades individuales y especímenes pequeños. Los ensayos a gran escala son útiles cuando es necesaria la magnitud de la resistencia cortante de la mampostería para un edificio específico o para una clase de mampostería, o cuando no son aplicables otras técnicas, como el caso mampostería reforzada.

Muchas técnicas analíticas avanzadas, como el método de elemento finito, requieren de información precisa sobre el módulo de cortante y el comportamiento lateral carga-deformación de la mampostería. El módulo de cortante es difícil de medir en la práctica y no es fácil correlacionar los resultados de los ensayos en especímenes a pequeña escala. La medida de las deformaciones durante los ensayos de carga a gran escala permite calcular el módulo de cortante de la mampostería.

Los ensayos de carga cortante en el sitio se realizan aislando el elemento que va a ensayarse y simularse con cargas sísmicas y de viento aplicando cargas laterales con gatos hidráulicos. El resto de la estructura se utiliza para que reaccione a las cargas aplicadas. La realización de ensayos a gran escala in situ puede ser complicada y requiere de una gran cantidad de planeación, trabajo y en la mayoría de los casos, reparaciones. Una ventaja es que el espesor de todo el muro se carga, proporcionando un indicador de la interacción entre los bloques individuales de mampostería.

D.1.5.1 Equipo

- Serrucho para mampostería
- Gato hidráulico
- Calzas
- Bomba para cargar el espécimen
- Marcador de calibres o transductor de desplazamientos

Existen serruchos que engastan las piedras siguiendo un camino o serruchos con cadena (serruchos potentes con dientes sobre una banda o cadena continua) y hoja de diamante segmentado utilizado para cortar a través del espesor del muro. Los aparatos para medir deformaciones se colocan para registrar a) desplazamiento total, b) deformaciones por flexión o por vibración y c) deformaciones por cortante diagonal. Las deformaciones se miden en tres o cinco puntos como mínimo (figura D-6a).

Se debe aislar una sección de la mampostería del resto de la estructura antes de aplicar la carga, mediante la extracción de una parte de la mampostería en cada lado del espécimen de ensaye (figura D-6a), por lo que existe la posibilidad de colapso durante la carga. Se aconseja contratar servicios de ingeniería con el fin de evaluar el planteamiento del ensaye y proporcionar recomendaciones de apuntalamiento y soporte de la mampostería adyacente.

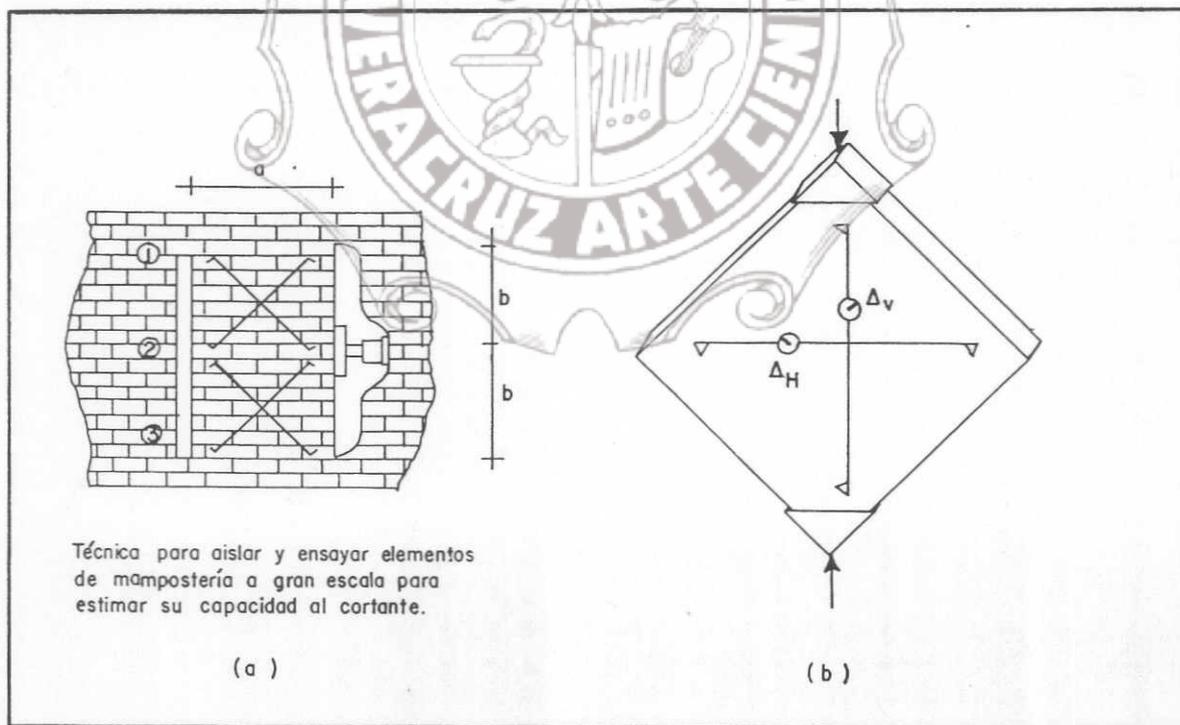


Figura D-6 (a) Ensayo de cortante en el sitio a gran escala, (b) instrumentación para un ensayo de laboratorio para determinar la resistencia a tensión diagonal de grandes paneles de mampostería (ASTM E519).

D.1.5.2 Procedimiento

La mampostería a ensayar debe ser representativa de las condiciones comunes sobre la estructura y generalmente es mejor ensayar en especímenes tan pequeños como sea posible debido a consideraciones del equipo y de logística, pero a la vez, el espécimen debe ser lo suficientemente grande para proporcionar una respuesta confiable a las cargas cortantes.

Las zonas estrechas y altas de los muros pueden fallar por flexión o por agrietamiento; las porciones de muros achaparradas y cortas son más apropiadas para la falla por cortante. En general, un espécimen que consta de 8 a 15 hiladas de mampostería con una esbeltez (razón altura a longitud) de 1.0 a 1.5 aproximadamente, es aceptable como un espécimen en voladizo. Pilas o porciones de muros empotrados en sus extremos superior e inferior podrían tener una razón de esbeltez de 2 o 3. Es difícil aislar adecuadamente un bloque de mampostería del resto del muro, por lo que generalmente es preferible ensayar el espesor del muro entero.

Para simplificar el procedimiento de aislar la mampostería se puede seleccionar una pila que limite con ventanas o puertas. Después de colocar los aparatos de carga en las aberturas que aíslan la mampostería se aplican las cargas cortantes de manera creciente hasta que ocurre la falla. Se registran las deformaciones para determinar el módulo de cortante. Puede ser conveniente incluir varios ciclos de descarga para obtener información de la resistencia y degradación de la rigidez bajo cargas cíclicas. El modo de falla final puede estar dominado por agrietamientos debido a la flexión, distribuido a lo largo de las juntas horizontales, o agrietamiento diagonal por cortante. Son útiles los mapas de grietas y dibujos para describir el modo de falla final.

Después del ensayo se necesitarán reparaciones que pueden ser difíciles y requerirán de apuntalamiento y de refuerzos, hasta que nuevamente se coloque la mampostería que le ayudará a recuperar la resistencia necesaria que soporte las cargas existentes.

D.1.5.3 Análisis de los resultados de ensayo

La gráfica de la curva carga-desplazamiento es útil para determinar la respuesta al cortante. El desplazamiento lateral se determina por la resta del movimiento de la base (registrado en las posiciones 1 o 3 en la figura D-6a) a la deformación total de la pila (registrada en la posición 2 de la figura D-6a).

La resistencia al cortante v_t se calcula dividiendo la carga de falla P para dos ciclos entre el área de la sección transversal de la mampostería A :

$$v_t = \frac{P}{A} \dots \dots \dots D.6$$

donde la falla puede ser definida como la carga máxima o la carga que causa el mayor agrietamiento ocurrido.

El módulo cortante no es constante porque las deformaciones de la mampostería son no lineales y disminuyen conforme el desplazamiento lateral se incrementa. Si la mampostería se considera homogénea e isotrópica, entonces los desplazamientos medidos pueden ser relacionados con los esfuerzos axiales del muro y con los esfuerzos cortantes. Naturalmente la mampostería no es homogénea ni isotrópica, sin embargo esta técnica da una aproximación razonable del módulo de cortante. Puede derivarse una relación de la expresión para la flexibilidad del muro considerando tanto desplazamientos por flexión como por cortante:

$$\frac{\delta}{P} = \frac{1}{k_0} = \frac{1.2h}{G_0 A} \left[1 + \frac{G_0}{\varepsilon_{33}} \frac{1}{1.2} \left(\frac{h}{d} \right)^3 \right] \dots\dots\dots D.4$$

donde δ = deflexión horizontal medida
 P= fuerza horizontal aplicada
 k_0 = rigidez lateral inicial
 A= área de la base del muro
 ε_{33} =módulo de compresión inicial de la mampostería
 h = altura del muro
 d = ancho del muro
 G_0 = módulo de cortante inicial

Los ensayos de cortante también pueden calcularse extrayendo especímenes cuadrados de 4 pies (1.22 m) de lado para ensayos de laboratorio recomendados por ASTM E519 "Standar Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assambles". La instrumentación en las diagonales del espécimen da información para el cálculo del módulo de cortante (figura D-6b). La extracción de estos especímenes puede ser costoso y normalmente no es conveniente. Sin embargo, el ensaye es bien conocido y puede dar una medida confiable de la tensión diagonal de la mampostería. La falla de estos especímenes generalmente es causada por agrietamiento debido a la tensión, la cual da un límite más bajo del estimado para la resistencia cortante de la mampostería.

D.2 Ensayes con gatos planos para la evaluación de mampostería en el sitio

Generalmente la información sobre el comportamiento a compresión de la mampostería se ha obtenido por extracción destructiva de prismas para evaluarse en ensayos de laboratorio. El método con gatos planos es una técnica realizada en el sitio que minimiza el daño a la mampostería durante el ensaye y permite medir directamente el estado de esfuerzos a compresión. La información sobre el estado de esfuerzos verticales es útil para modelos analíticos de evaluaciones estructurales, es valiosa para el análisis de arcos, bóvedas y otras estructuras complejas de mampostería.

Los ensayos de esfuerzos y deformación en el sitio están basados en el principio sencillo de liberación de esfuerzos y deformaciones, respectivamente. Los ensayos de esfuerzos miden la compresión en la mampostería ante cargas muertas, cargas vivas, esfuerzos inducidos térmicamente o transferencias de cargas debidas a la contracción en los marcos de una estructura. Los ensayos de esfuerzos también pueden realizarse en una pila cargada excéntricamente o de un muro para determinar la magnitud de los momentos flexionantes inducidos.

En ambos ensayos, los resultados corresponden únicamente al bloque ensayado, el esfuerzo o la deformación en otros bloques de la mampostería puede ser diferente. Se supone que la mampostería circundante es homogénea y se deforma simétricamente alrededor de la hendidura. Estas suposiciones no son estrictamente ciertas para la mampostería, pero algunas investigaciones experimentales y analíticas han demostrado que el efecto de las redistribuciones de carga y de las deformaciones no proporcionales pueden ser despreciados. Algunos ensayos de laboratorio han demostrado que las pruebas de esfuerzo en el sitio tienen un margen de error del 20%, mientras que el método de deformaciones generalmente sobrestima el módulo de compresión de la mampostería del 15 al 20%. Comparando los ensayos realizados con gatos planos y los ensayos en prismas extraídos de la mampostería, el primero proporciona una medida razonable del comportamiento a compresión de la mampostería.

D.2.1 Antecedentes

Se ha probado el ensaye con gatos planos en mamposterías de ladrillos sólidos no reforzados y de piedra natural, aún no se han establecido las aplicaciones en mampostería reforzada. Los métodos de ensaye estándar ASTM C1196-91, "Esfuerzos a compresión en el sitio en la mampostería con unidades sólidas, mediante Gatos Planos" y C1197-91, "Mediciones en el Sitio de las Propiedades de Deformabilidad de la Mampostería utilizando el Método de Gatos Planos", describen las dos técnicas de evaluación de la mampostería.

D.2.2 Equipo

El equipo para el ensaye con gatos planos no es caro ni requiere para su ejecución de personal con gran experiencia y consiste de:

- Equipo para quitar el mortero (taladro o serrucho para mampostería)
- Dos o más gatos planos
- Calzas para los gatos planos
- Bomba hidráulica, calibrados de presión y mangueras
- Reloj calibrador o electrónico LVDT's para medir la deformación
- Equipo de seguridad

Extracción del mortero

Se elimina una parte de la junta de mortero horizontal para colocar en ese espacio el gato plano. En morteros antiguos y débiles esto se puede realizar más fácilmente perforando el mortero por puntos, es decir, haciendo perforaciones sucesivas, espaciadas estrechamente, para lograr hacer huecos en la junta. Se recomiendan brocas de núcleo vacío para mampostería. No se deben utilizar taladros martilladores de alta potencia o cinceles que puedan vibrar y debilitar la unión en las juntas del mortero adyacente.

Gatos planos

Un gato plano es una placa delgada de acero envuelta y sellada en sus extremos, con accesorios para fijarse y permite la presurización interna por medio de equipo hidráulico. Los gatos planos pueden fabricarse de cualquier medida o forma, pero generalmente se utilizan algunos diseños específicos en la evaluación de la mampostería, su ancho es igual al de la unidad de mampostería que será cargada y sus espesores deben adaptarse a la junta del mortero. Los gatos planos rectangulares se utilizan para aberturas en donde el mortero se retira taladrando por puntos, y los gatos circulares tienen un radio en cada extremo para ajustarse perfectamente en una abertura realizada con serrucho para mampostería. Los dos tipos tienen una longitud igual a dos o más unidades (figura D-7a y b) y pueden utilizarse tanto para ensayos de esfuerzo como para ensayos de deformación en el sitio. Si los gatos son muy pequeños sólo son útiles para ensayos de esfuerzo en el sitio (figura D-7c y d).

Los gatos planos son flexibles y tienen una presión máxima de 1000 psi cuando se utilizan para mampostería. Debido a la rigidez interna del gato y a la flexibilidad de sus bordes soldados se necesita calibrarlo antes de su uso para determinar la relación entre la presión interna y el esfuerzo aplicado a la mampostería. La calibración requiere medir el rendimiento del esfuerzo del gato plano como una función de la presión hidráulica, la constante de calibración k_m será menor que 1.0 y se usa como un modificador de la presión hidráulica medida. Los gatos planos ablandados por el uso repetido deben recalibrarse después de cinco ensayos (ASTM C1196 y C1197 contienen una descripción completa sobre el procedimiento de calibración).

Calzas

Es importante que el gato plano se conserve cerca de su espesor calibrado original durante el ensaye para evitar que cambie el factor de calibración. Por lo que, antes de presurizar, se deben colocar unas calzas alrededor del gato plano para ajustarlo a la abertura y cubrir los pequeños huecos internos que puedan dañarlo, además de que ayudan a quitar el gato después del ensaye. No se permite rellenar con lechada para ajustar el gato porque el mortero puede fluir dentro del cuello de la junta o de espacios vacíos adyacentes, alterando el comportamiento a compresión de la mampostería.

Las calzas tendrán la misma forma y medida que el gato plano que se utilice. Pueden utilizarse calzas rígidas de metal si la abertura tiene un espesor constante; se usan calzas de varias piezas cuando las ranuras son irregulares. No es muy conveniente utilizar calzas rígidas de metal porque puede ocasionar un comportamiento rígido erróneo bajo esfuerzos de compresión debido a que las calzas se deforman bajo esfuerzos pequeños. Puede obtenerse una transferencia de esfuerzos más uniforme del gato a la mampostería cuando se utilizan gatos planos adicionales como calzas de "banda fluida". Se colocan uno o más gatos planos adicionales alrededor del gato de ensaye ajustados por una presurización de alrededor del 80% de la carga máxima estimada. Esto obliga al gato a deformarse dentro de las pequeñas irregularidades en la abertura y ayuda a asegurar un contacto total con la mampostería circundante.

Equipo hidráulico

Se utiliza una bomba hidráulica para presurizar los gatos planos. Son adecuadas tanto bombas manuales como electrónicas. Para el ensaye puede utilizarse un indicador de presión de calidad con un reloj de 4 o 6 plg de diámetro y una precisión mínima de 1% del total. El indicador tendrá un rango aproximado igual a la capacidad del gato plano.

Se requieren mangueras hidráulicas para conectar la bomba con los gatos planos. Para evitar que el aceite se derrame durante la conexión de las mangueras se ajustan los gatos planos con las válvulas o se usan accesorios de conexión rápida. Se recomiendan equipos hidráulicos que utilizan agua u otros fluidos que no manchan si las estructuras ensayadas tienen una importancia arquitectónica.

Medida de la deformación

El ensaye de esfuerzos en el sitio requiere de instrumentos que midan la deformación que no se fijen rígidamente a la superficie de la mampostería: las lecturas se toman antes y después de hacer la abertura. El más apropiado para estas medidas es un extensómetro movable de varias longitudes como un indicador Whittemore. El aparato de medición puede tener una resolución mínima de 0.0002 plg.

La instrumentación puede fijarse a la superficie de la mampostería después de preparar las aberturas para el ensaye de deformabilidad en el sitio. El calibrador Whittemore movable se puede usar durante el ensaye de deformación, sin embargo por el gran número de lecturas resulta una tarea tediosa, es más útil fijar los calibradores en la superficie. Cuando no se dispone de electricidad, los discos calibradores son una alternativa económica. Un disco calibrador con una aproximación de 0.0002 plg es suficiente para realizar el ensaye de deformación en la mampostería.

Pueden fijarse a la superficie de la mampostería aparatos electrónicos como los transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT's) que dan una mejor aproximación de 0.0001 plg, son más caros que los discos calibradores de resolución similar, pero en gran parte disminuyen el tiempo de ensaye y no requieren de monitoreos exactos por el operador que realiza el ensaye. Los LVDT's necesitan una fuente de potencia AC o DC y algún método para medir la potencia del voltaje. La potencia del voltaje puede medirse manualmente utilizando un contador digital; sin embargo la técnica preferible es conectar a un aparato que adquiera los datos y a una computadora portable. Este sistema se basa en adquirir los datos automáticamente durante el ensaye permitiendo desplegar en tiempo real la curva carga-desplazamiento o esfuerzo-deformación. Los datos pueden escribirse directamente a la computadora para graficarlos y reducir los datos.

Equipo de seguridad

Se recomiendan guantes y protección para los ojos o máscaras para la cara con el fin de proteger al operador en caso de que el equipo hidráulico falle. Durante la preparación de la grieta, se requieren guantes y protección de ojos y cara, también es necesaria una mascarilla para protegerse del polvo o respirador.

D.2.3 Procedimiento del ensaye

Las deformaciones correspondientes se miden utilizando compresómetros para obtener una medida del comportamiento a compresión de la mampostería. El módulo de compresión se calcula a partir de la curva experimental esfuerzo-deformación; la mampostería puede cargarse hasta la falla para determinar la resistencia a compresión, pero no siempre es conveniente debido a consideraciones estéticas y estructurales; el ciclo de carga generalmente se termina cuando la curva esfuerzo-deformación no es lineal, indicando la falla. Entonces la máxima resistencia a compresión puede estimarse a partir de la forma de la curva esfuerzo-deformación.

La preparación para el ensaye de esfuerzos y de la deformación en el sitio es similar. Primero se describe la manera de colocar el equipo básico para el ensaye, después los procedimientos específicos de cada ensaye.

Ubicaciones del ensaye

Las ubicaciones del gato plano se elegirán en base a los objetivos planteados, es preferible que se realicen donde exista una masa suficiente sobre los gatos planos para que resista los esfuerzos aplicados. Se requiere obtener una transferencia consistente de esfuerzos del gato plano a la mampostería, por lo que es mejor evitar áreas que tengan juntas irregulares, demasiados huecos o unidades quebradas. Se deben evitar los ensayos cerca de puertas, de cambios del espesor u otras concentraciones de esfuerzos.

Los grandes esfuerzos aplicados en el ensaye de deformación a menudo causan un agrietamiento notable cerca de los gatos planos en estructuras de mampostería ligeramente esforzadas o de bases débiles. No es necesario cargar todo el espesor del muro en cada ensaye, se obtienen resultados más confiables si se carga todo el espesor el muro, pero esto no siempre es posible cuando se ensayan estructuras de piedra natural o de varios bloques masivos. Los gatos planos deberán cargarse de acuerdo a su tamaño en un mínimo de un bloque de mampostería en cualquier caso.

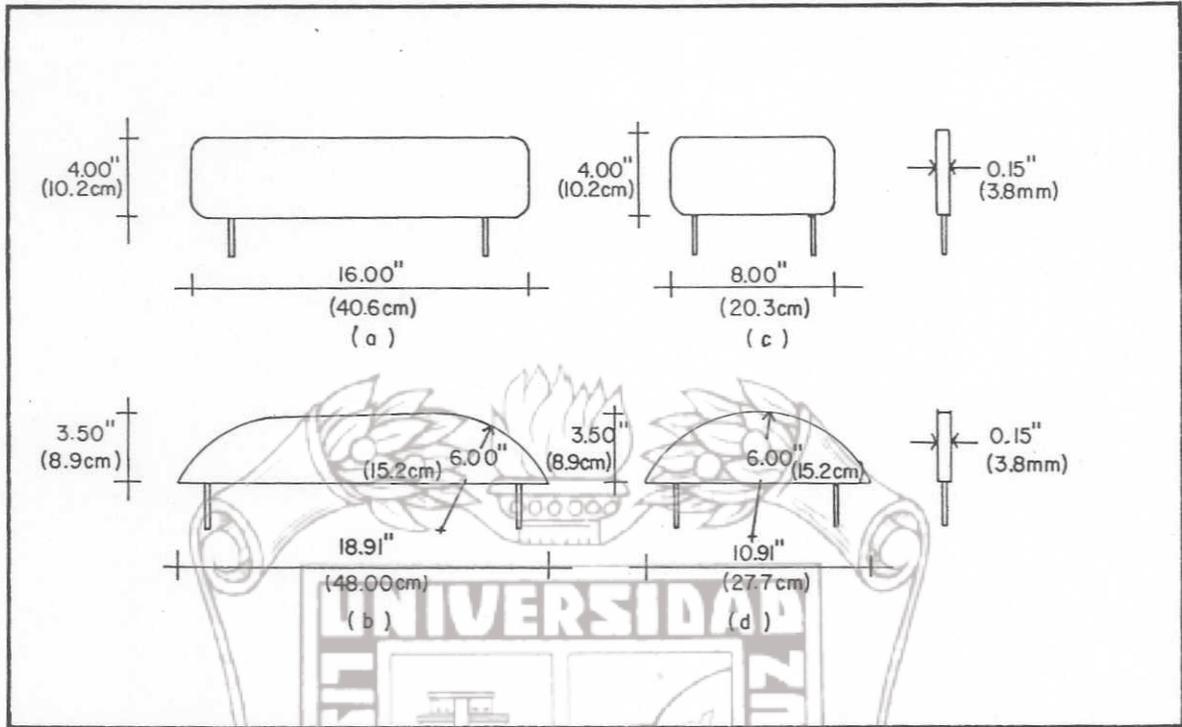


Figura D-7 Configuraciones de gatos planos. Los tipos (a) y (c) son útiles cuando el mortero se retira taladrando por puntos, los tipos (b) y (d) cuando se utilizan serruchos circulares.

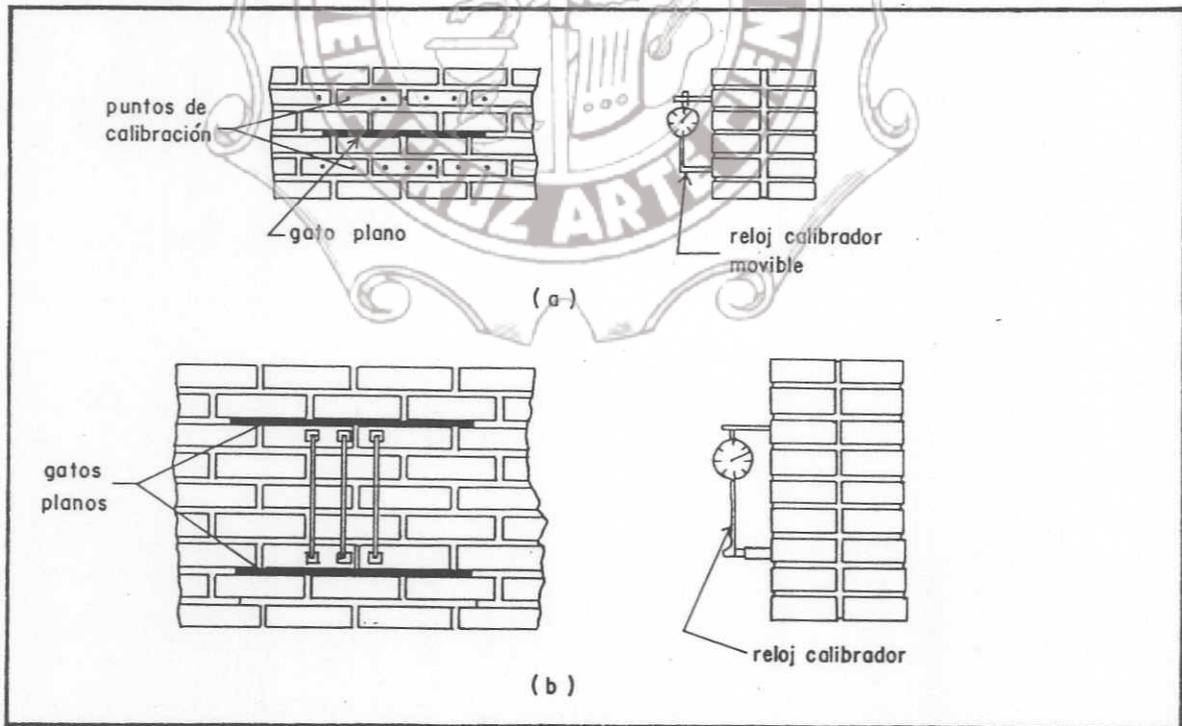


Figura D-8 (a) Disposición de un ensaye de esfuerzos en el sitio, (b) Equipo para ensayes de deformación en el sitio.

Los muros de mampostería con varios bloques presentan variaciones en sus propiedades y en la calidad de la construcción a través del espesor del muro. El bloque expuesto en la fachada del edificio se construye generalmente con unidades de alta calidad, adecuados para la apariencia arquitectónica, la mampostería en el interior de los muros puede tener unidades de baja calidad, piedras naturales o cascajo, que en estructuras masivas a base de muros de carga pueden comprender la mayoría del elemento estructural. Debido a estas diferencias es aconsejable ubicar los ensayos de deformación en los bloques interiores y exteriores. Para hacer esto se retira el recubrimiento o una porción del bloque exterior para tener acceso al interior del muro.

Los gatos planos para ensayos de mampostería se hacen lo suficientemente delgados para adaptarse dentro del espacio que ocupaba la junta horizontal de mortero. Si se requiere información sobre el comportamiento a compresión horizontal o diagonal, también se puede obtener utilizando gatos planos si lo permite el serrucho de corte. Debido a la variación de los resultados obtenidos en los ensayos con gatos planos, para obtener una muestra estadística se realizan tres o cinco ensayos en cada área de interés.

Preparación de la abertura

Una vez que el área de ensayo ha sido elegida, se marca la abertura cuidadosamente, indicando el mortero que debe quitarse. Se debe quitar todo el mortero de la junta para obtener una superficie lisa y colocar el gato plano. Esto puede realizarse más fácilmente utilizando serruchos para mampostería con hojas de diamante enfrías con agua. Los morteros débiles pueden extraerse mejor perforando por puntos y después limpiar el mortero restante con cinceles o martillos. Se utiliza un limpiador con aire o una aspiradora para retirar todas las partículas de la abertura, antes de insertar el gato plano.

Presurización inicial

Después de colocar en la abertura los gatos planos y las calzas, el gato plano se "asienta" por una presurización de 200 psi como mínimo o del 80% de la presión máxima esperada con tres ciclos separados. Las fuerzas del proceso de asentamiento ajustan el gato para cualquier pequeña irregularidad en la abertura con el fin de minimizar durante el ensayo concentraciones de esfuerzos y deformaciones del gato plano.

Mediciones iniciales del ensayo de esfuerzo en el sitio

Se requiere medir los desplazamientos antes de quitar el mortero para la abertura del gato plano. En general se utilizan de 3 a 10 líneas separadas de puntos de medición. En la figura D-8a se muestra una posible disposición del ensayo, se muestran 7 líneas de medición distribuidas sobre la abertura. Es preferible evitar poner los puntos de indicación en las unidades cercanas a la abertura ya que estas unidades pueden alterarse ligeramente durante la extracción del mortero. Se utilizan epóxicos para sujetar los puntos de indicación firmemente a la mampostería y se debe evitar que estos puntos se coloquen en las juntas de mortero.

Las mediciones realizadas antes del ensayo se utilizan para determinar la ubicación inicial de los puntos de indicación. Se debe repetir varias veces la lectura inicial, ya que esta información es importante y forma una base para futuras comparaciones. Se retira el mortero, después se completan las medidas iniciales y es importante no alterar durante este proceso los puntos de indicación o las unidades.

Restauración del esfuerzo

Después de extraer el mortero de la abertura para el gato plano, se realiza otra serie de mediciones ya que disminuye la separación entre los puntos de indicación debido a la liberación de esfuerzos causada por la extracción del mortero de la junta. Los gatos se insertan y se colocan como se describió anteriormente; se aumenta la presión en pequeños incrementos de 10 a 20 psi mientras se monitorean las separaciones de los puntos de indicación. La mampostería más antigua tiene un esfuerzo a compresión que fluctúa de valores menores que 10 psi ascendiendo a 100 psi. Los esfuerzos en el sitio de 150 psi o más se han registrado en mamposterías sobreesforzadas. Los esfuerzos de compresión en mamposterías modernas reforzadas pueden ser altas variando de 300 psi a 500 psi.

Cuando se ha restablecido la separación original entre los puntos de indicación, se registra la presión hidráulica interna de los gatos planos. Se modifica esta presión por la constante de calibración y por una constante de área para indicar el estado de esfuerzos de compresión de la mampostería presente en el lugar del ensaye. En la figura D-9 se muestran una serie de mediciones comunes donde las curvas individuales muestran la variación en la separación de los puntos de indicación para los niveles de esfuerzos indicados. En este caso se midió un esfuerzo de compresión promedio de 280 psi.

Cuando se ha determinado el esfuerzo de restitución se reduce a cero la presión del gato plano. El gato plano debe permanecer en el lugar si se va a realizar el ensaye de deformación, en este caso se inserta un segundo gato plano separado por varias hiladas del primer gato y paralelo a éste. De esta manera el trabajo necesario para quitar el mortero y el establecimiento del ensaye se hace más eficiente. Para realizar cada ensaye de esfuerzos en el sitio se requieren entre 4 y 8 horas-hombre, dependiendo en gran medida de la condición del mortero y del tiempo requerido para la preparación de la abertura. Este ensaye puede realizarse en menos de una hora.

Medidas de la deformación en ensayos de deformación

El ensaye de deformación en el sitio utiliza dos gatos planos colocados en forma paralela y separados verticalmente por varias hiladas, que someten la mampostería a esfuerzos de compresión. La separación entre los gatos no es mayor que la longitud del gato y normalmente es de 3 a 5 hiladas de mampostería. Son necesarias varias líneas verticales de medición de la deformación (figura D-8b). Algunas investigaciones han demostrado que el estado de esfuerzos a compresión es más consistente cerca de la mitad de la longitud del gato plano; fuera de esta área el estado de esfuerzos es afectado por la restricción de la mampostería adyacente y pueden llevar a lecturas erróneas de la deformación. Se ubican tres aparatos centrados en la tercera parte de la longitud del gato plano, los datos de los tres indicadores se promedian para obtener la información de la deformación.

Aplicación del esfuerzo

Los gatos planos se presurizan en incrementos de 5 a 20 psi. Las mediciones de la deformación se registran en cada nivel de esfuerzo para la gráfica esfuerzo-deformación o carga-desplazamiento, si es aceptable el daño a la mampostería, el ensaye puede llevarse a la falla. Generalmente es preferible terminar el ensaye cuando la curva llega a ser altamente no lineal, indicando con esto la falla inminente. Puede obtenerse un indicador del comportamiento cíclico mediante series de cargas repetidas (figura D-10).

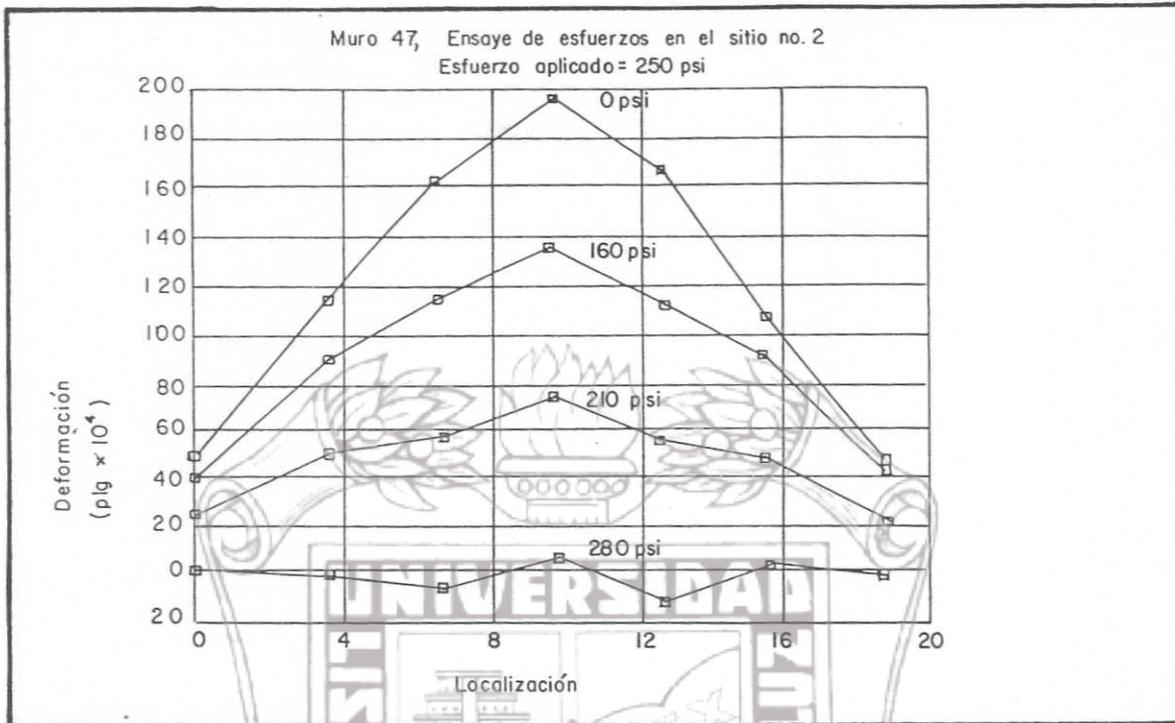


Figura D-9 Datos de un ensayo de esfuerzos en el sitio con deformaciones en la mampostería alrededor de la hendedura para varios niveles de presión en los gatos planos.

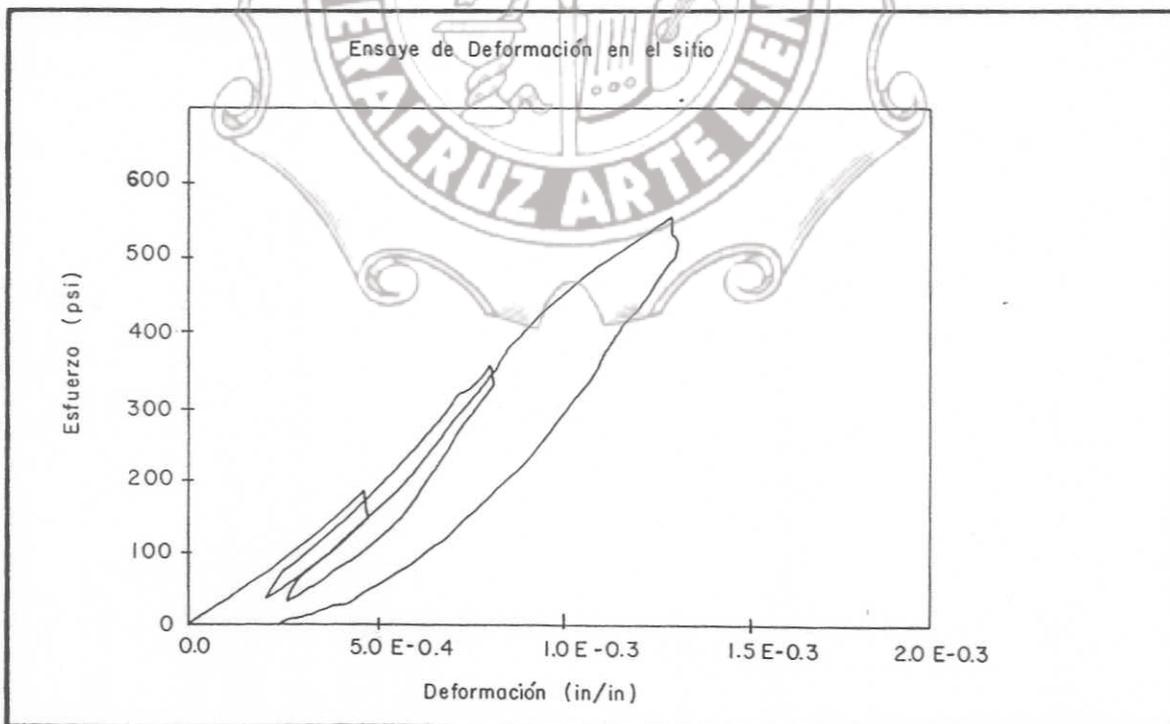


Figura D-10 Datos de esfuerzo-deformación obtenidos durante un ensayo de deformación en el sitio cíclico.

La mampostería más antigua tiene una resistencia a compresión máxima que fluctúa de 300 a 1500 psi y más. Los valores para el módulo de compresión inicial oscilan generalmente de 70 a 1500 ksi, dependiendo del tipo de unidad, de la calidad del mortero y del deterioro general de la mampostería.

Para el ensaye de deformación en el sitio se requiere mayor trabajo para preparar la abertura y colocar el equipo que en el ensaye de esfuerzos en el sitio. La preparación del ensaye requiere entre 4 y 6 horas-hombre, la aplicación de la carga y la medición de la deformación requiere menos de una hora y las reparaciones después del ensaye necesitan menos de una hora y media.

2.2.4 Análisis e interpretación de los resultados

Conversión de la presión del gato plano a esfuerzos

La presión interna del gato plano debe modificarse por dos factores para determinar el esfuerzo aplicado a la mampostería. El factor de calibración k_m relaciona la presión interna del gato plano con el esfuerzo medio producido por el gato, normalmente el proveedor da este dato. El factor de área k_a es la razón del área del gato plano dividido por el área de la abertura y debe determinarse para cada ubicación del ensaye. El esfuerzo aplicado a la mampostería, σ , se calcula multiplicando la presión hidráulica medida P por estas dos constantes:

$$\sigma = P * k_m * k_a$$

Módulo de compresión

El principal objetivo del ensaye de deformación en el sitio es obtener una medida del módulo de compresión de la mampostería. Pueden usarse varias medidas diferentes de módulos (figura D-11), y la medida usada debe identificarse en el reporte del ensaye. La rigidez inicial puede indicar el cierre de pequeñas grietas o la deformación del gato plano a esfuerzos bajos, normalmente esto no se considera. Para indicar el módulo de compresión la parte lineal inicial de la curva esfuerzo-deformación puede ajustarse con la línea recta usando regresión lineal. Un valor más útil para los análisis ingenieriles es el módulo de 33 o 50 % de la resistencia máxima de compresión. Esta medida se obtiene calculando la pendiente de una línea dibujada en la curva esfuerzo-deformación entre los puntos que representan el 5% y el 33 o 50% de la resistencia a compresión. El punto inicial de 5% se usa para evitar cualquier no linealidad inicial o la curva descrita anteriormente.

Estimación de la resistencia a compresión

Se han desarrollado varios procedimientos analíticos para describir el comportamiento a compresión de la mampostería, estas técnicas se utilizan para conocer el comportamiento estándar de la mampostería a compresión basándose en el módulo inicial y en la curvatura de la gráfica esfuerzo-deformación. Estos modelos matemáticos descriptivos se han desarrollado para combinaciones específicas de acuerdo al tipo de mortero y de las unidades y pueden no ser aplicables a todos los tipos de mampostería.

Una técnica sencilla para la estimación de la resistencia máxima es utilizar un programa de software que permita ajustar la curva. Puede ajustarse a los datos de ensaye una curva polinomial para determinar la resistencia máxima a compresión. Se obtiene una estimación confiable de la resistencia a compresión si la curva ajustada se conforma razonablemente bien a la forma de los datos de ensaye y si la mampostería se cargó satisfactoriamente dentro del rango inelástico.

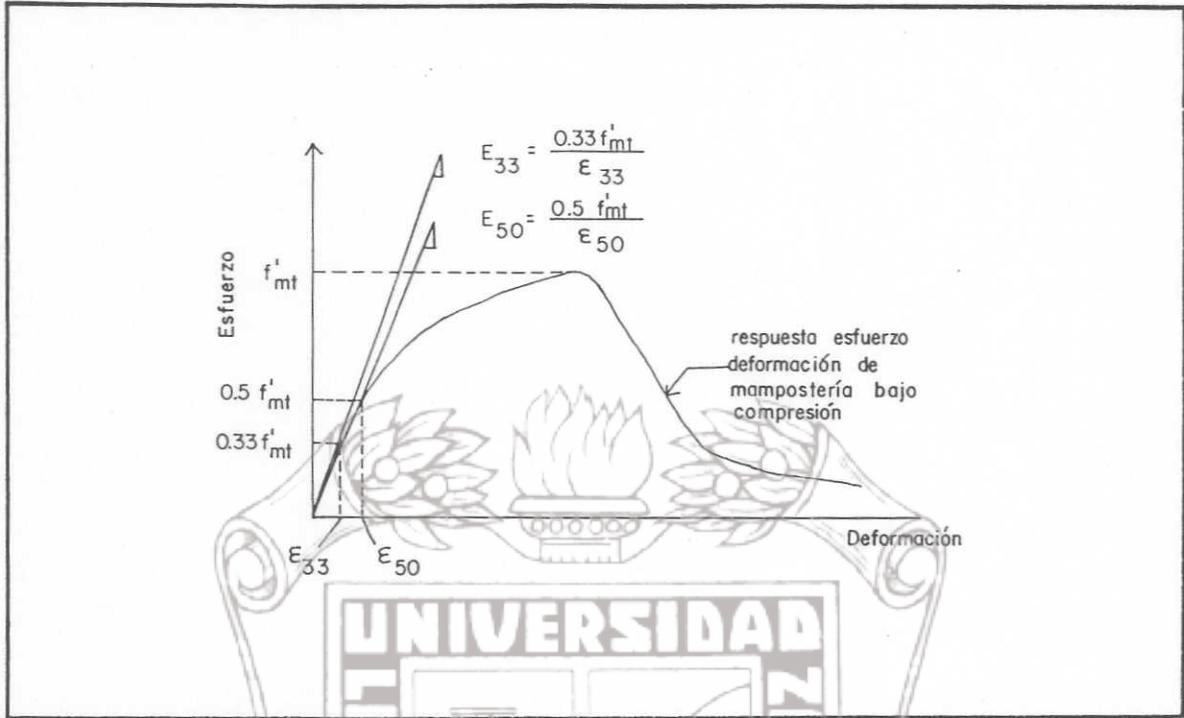


Figura D-11 Módulos de compresión definidos como la pendiente de la porción inicial de curva esfuerzo-deformación que puede ser determinada con regresión lineal o un módulo de 5% a 33 o 50% de la resistencia de compresión.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Aguilar López, Y., 1990. Dos viajeros del siglo XVIII. Dirección de Patrimonio (IVEC).
- (2) Alcocer, M., 1997. Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.
- (3) Arnold, Ch., 1993. Configuración y diseño sísmico de edificios. LIMUSA.
- (4) Carricart-Gavinet, J., 1994. Los corales escleractinios en la fortaleza de San Juan de Ulúa, Veracruz. Instituto de investigación oceanográfica del Golfo y Mar Caribe.
- (5) Cortez, M., 1992. Modelo de elemento finito para análisis estructural de la Catedral Metropolitana. Tesis UNAM.
- (6) Del Paso y Troncoso, F., 1969. La ciudad de tablas. Colección Suma Veracruzana.
- (7) Escamilla, M., 1995. Información geográfica e histórica de la ciudad y puerto de Veracruz. Composición bibliográfica. Archivo y biblioteca históricos, Veracruz.
- (8) Figueroa, J., 1968. La sismicidad en el Estado de Veracruz. Instituto de Ingeniería, UNAM, serie no.167.
- (9) Francis, A., 1984. Introducción a las estructuras. Editorial Limusa.
- (10) Giuffré, A., 1996. Vulnerabilidad y preservación de centros históricos en áreas sísmicas. XI Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica. Artículo no. 2085.
- (11) González, A., 1988. Manual técnico de procedimientos para la rehabilitación de monumentos históricos en el Distrito Federal. INHA, Depto. del D.F.
- (12) Izunza N., 1997. Determinación de la velocidad regional, para el diseño por viento de estructuras en la ciudad y puerto de Veracruz. Tesis Instituto de Ingeniería Universidad Veracruzana.
- (13) Linderburgh, M. Seismic Design of Building Structures.
- (14) López, C., 1992. Estudio de la condición actual de la Catedral Metropolitana. Tesis UNAM.
- (15) Mangino A., La restauración arquitectónica. Editorial Trillas.
- (16) Meli, R., 1993. Diseño estructural. LIMUSA.
- (17) Meli, R., Sánchez, R. 1996. Aspectos de seguridad sísmica de monumentos históricos. XI Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica. Artículo no. 2987.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

- (18) Meli, R. 1989. Seguridad sísmica de edificios históricos. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. III.
- (19) Meli, R., 1971. Propiedades mecánicas de la mampostería. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- (20) Miranda J., Zonificación geotécnica de las ciudades de Veracruz y de Boca del Río. Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana.
- (21) Peña Pardo B., 1986. Identificación de parámetros en sistemas no lineales sometidos a la acción de fuerzas sísmicas. V Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Artículo H-3.
- (22) Peña Pardo C., 1995. Fundamentos básicos de ingeniería sísmica y dinámica estructural. Tesis de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.
- (23) Penelis, G., 1996. Técnicas y materiales para restauración estructural. XI Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica. Artículo no. 2089.
- (24) Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. 1987. Editorial Porrúa.
- (25) Rodríguez H., 1991. Veracruz, la ciudad hecha del mar. IVEC, 1991
- (26) Sánchez A., 1998. Aspectos básicos del comportamiento estructural de Monumentos Coloniales. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Vol. I
- (27) Vilaboa, P., 1996. Origen y análisis arquitectónico del patio central en construcciones habitacionales del s. XVIII ubicados en el Centro Histórico de la ciudad de Veracruz. Tesis UCC.

