



872715

8

Universidad Don Vasco A.C.  
Incorporada a la Universidad  
Nacional Autónoma de México  
con el No 8727-15

Análisis Sísmico Histórico  
del Edificio  
de la Huatápera

Tesis Profesional que para obtener el Título de:  
Ingeniero Civil

Presenta:

Laura Eugenia Sandoval Ledesma

Uruapan, Michoacán. Noviembre 2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

217 550

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]

67

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

WOO GENT  
1908 10 11

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Índice

Introducción.....	7
-------------------	---

## I Antecedentes Históricos

1.1.- Ubicación.....	13
1.2.- Orígenes.....	14
1.3.- Construcción.....	16
1.4.- Daños y modificaciones.....	20
1.5.- Situación actual.....	22

## 2 Sismos Históricos

2.1.- Origen de los sismos.....	29
2.2.- Tipos de sismos.....	31
2.3.- Características de los sismos.....	33
2.4.- Sismos relevantes en Michoacán.....	37
2.5.- Sismo del 19 de Junio de 1858.....	40
2.6.- Sismo del 19 de Julio de 1882.....	45
2.7.- Sismo del 19 de Septiembre de 1985.....	46

## 3 Estudios de Sismicidad

Estudios de sismicidad realizados para Uruapan.....	51
3.1.- Atenuación de ondas.....	52
3.2.- Fuentes sísmicas.....	53
3.3.- Obtención determinista del peligro sísmico.....	55
3.4.- Obtención probabilista del peligro sísmico.....	59
3.5.- Espectros de diseño sísmico.....	62

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

#### **4 Propiedades de la Mamposteria**

4.1.- Propiedades de los materiales componentes.....70  
4.2.- Propiedades del conjunto piedra-mortero.....75

#### **5 Propiedades del Adobe**

5.1.- Propiedades mecánicas del adobe.....79  
5.2.- Propiedades geométricas de las estructuras de adobe.....80  
5.3.- Idealización estructural para el análisis sísmico.....81

#### **6 Método de los Elementos Finitos**

6.1.- Elasticidad bidimensional.....89  
6.2.- Elemento finito triangular de 3 nodos.....91  
6.3.- Elemento finito rectangular de 4 nodos.....92  
6.4.- Teoría de placas delgadas y gruesas.....95

#### **7 Análisis del Edificio.....99**

#### **Conclusiones.....121**

#### **Anexo.....125**

#### **Bibliografía.....127**

#### **Relación de Figuras.....131**

#### **Relación de Cuadros.....136**

WOD BIZET  
WOMEN'S STUDY

# Introducción

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Introducción

México es una tierra de temblores y quienes vivimos en ella tenemos el reto de estudiar la historia que envuelve a estos fenómenos que tanto nos afectan, para conocer todos los datos necesarios que nos ayuden a entender cuándo, dónde y con qué intensidad ocurrieron, y así, predecir sus posibles características en el futuro y los efectos que puedan tener en nuestra sociedad.

El gran potencial sísmico de nuestro país quedó de manifiesto con los sismos ocurridos en septiembre de 1985, los cuales marcaron la pauta para desarrollar una conciencia del riesgo sísmico en nuestra sociedad, así como una cultura sísmica mexicana.

La sismología es una ciencia de reciente inicio, ya que sus orígenes se remontan a fines del siglo XIX, cuando se comenzaron a instalar los primeros sismógrafos en el mundo, lo que permitió tener un registro de la actividad sísmica de la tierra para estudiar posteriormente las ondas sísmicas registradas y el movimiento del terreno al paso de éstas.

Uno de los medios empleados por los sismólogos para conocer las características y ocurrencia de los sismos en tiempos pasados es el estudio de los registros históricos, anteriores a los registros instrumentales, lo cual nos refleja el comportamiento sísmico de una región o de una falla geológica activa al hacer un análisis cualitativo de los daños producidos por sismos ocurridos en épocas anteriores. En México,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Fig. 1: Una vista de La Huasteca. Fotografía propia.

historiadores de todas las épocas han contribuido con sus investigaciones a mantener la memoria de los sismos, pero sus esfuerzos se encuentran dispersos, no han tenido la continuidad necesaria y no se han actualizado con datos de fuentes antes desconocidas o inaccesibles.

El desarrollo industrial y el crecimiento demográfico del mundo moderno hacen necesaria la toma de decisiones sobre la seguridad y confiabilidad de unidades habitacionales, de instalaciones industriales y de la infraestructura crítica de una nación, como puentes, presas y plantas nucleares. Por tanto, surge la necesidad de una estimación más confiable del peligro sísmico, complementando la sismicidad de los últimos decenios, registrada instrumentalmente, con información histórica de los sismos más importantes del pasado.

El propósito del presente trabajo consiste en hacer un análisis sísmico de la estructura del edificio de La Huatápera, remontándonos a eventos que han sucedido en el pasado para así estimar los daños que pudiera sufrir con sismos futuros. Su comportamiento se puede estimar en función de los parámetros de diseño obtenidos de los estudios de peligro sísmico que se han realizado para la ciudad de Uruapan, los cuales nos proporcionan una aceleración y un

periodo de recurrencia probables para un sismo, que aplicados a un edificio y al realizar el análisis de éste podemos obtener la respuesta sísmica de una estructura en particular.

Debido a que la construcción tiene más de 450 años, durante los cuales se ha visto amenazada por varios fenómenos entre los que destacan los sismos de naturaleza diversa, es interesante conocer el comportamiento que ha tenido el edificio ante éstos fenómenos, ¿cómo es que ha resistido tal cantidad de movimientos sin presentar daño alguno a lo largo de su existencia?

Es probable que los elementos que forman parte de la estructura sean una aportación hoy en día para construir o diseñar estructuras resistentes a sismos, retomando los métodos empleados en la antigüedad y cuyo funcionamiento ha sido satisfactorio.

Uruapan tiene un patrimonio histórico de gran importancia no sólo para quienes aquí vivimos, sino para todos los michoacanos y aún para todo el país. Ello significa que también tenemos responsabilidades en su cuidado, conservación y protección, no sólo de este bellissimo edificio, sino de todo aquello que aún guarda las imágenes de la historia de nuestra ciudad. La Huatápera representa nuestra cultura regional y nuestra identidad.

# Capítulo 1

Antecedentes  
Históricos  
de la Huatápera



## 1.1 Ubicación

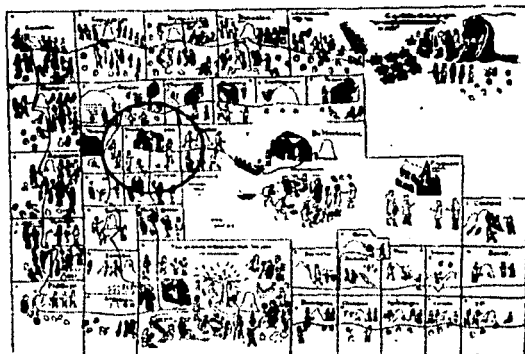
En este primer capítulo se presentan los antecedentes históricos de la fundación de la ciudad de Uruapan y de La Huatápera, las características arquitectónicas originales del edificio y las del conjunto eclesialístico del cual formó parte. Estos datos nos serán útiles para comprender la importancia histórica, social y estética de La Huatápera, cuya mención más antigua data de 1639 por el padre Fray Alonso de la Rea, y para revalorar el patrimonio de nuestra ciudad.

Acerca de la fundación de la ciudad de Uruapan, se sabe que existía ya desde antes de la llegada de los españoles. En el lienzo de Jucutacato se le menciona como un lugar de paso en la peregrinación de los Aztecas. No se sabe cuál sería su importancia, pero esta referencia es la más antigua que hay sobre la ciudad, previa a la llegada de Fray Juan de San Miguel.

Se tienen antecedentes de que antes de la llegada de los conquistadores a la Nueva España, había un pequeño núcleo de chozas en lo que ahora es el barrio de La Magdalena y se extendía al ahora barrio de San Francisco, habitado por purhépechas que formaban parte del reino cuya capital fue Tzintzuntzan. Este pequeño poblado se conocía con el nombre de *Urhupan*, que en purhépecha quiere decir donde abundan las flores (MORENO, 1987: 2-10).

Uruapan está ubicada a más de 1600 m.s.n.m. en la vertiente sur de la Sierra Madre de Uruapan, que forma parte del eje volcánico. Se encuentra en un nivel intermedio entre las cálidas tierras bajas del río Balsas y el altiplano del río Lerma (KUBLER, 1982: 84).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Arriba: Fig. 2: Lienzo de Jucutacato, en donde se menciona la ciudad de Uruapan. Fuente: CORONA, 1984: 104.

Abajo: Fig 3: Una vista de Uruapan en 1945. Fuente: Colección Particular.

## 1.2 Orígenes

El surgimiento de los hospitales en la Nueva España se debe primeramente al impulso que los reyes de España dan a la obra hospitalaria. Existe una Cédula Real otorgada por Carlos I con fecha del 7 de Octubre de 1541, por medio de la cual se ordena a Virreyes, Audiencia y Gobernadores que en todos los pueblos de españoles e indios de sus provincias y jurisdicciones, se funden hospitales donde sean curados los pobres enfermos y ejercite la caridad cristiana.

HOL  
MEDIO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Hospital se entendía como refugio, casa, hospedaje, donde podían acudir los pobres, pero ante todo se perseguía la instrucción religiosa de los indígenas. El promotor fue el Lic. Vasco de Quiroga, quien llegaría a ser el primer obispo de Michoacán.

Era costumbre en España dedicar un anexo de los conventos y de las comunidades religiosas, para albergue de los viajeros a quienes sorprendía la noche por los caminos; esos mismos anexos estaban dedicados también a servir de

hospitales a fin de atender a los enfermos que solicitaban atención para sus males, ya fueran enfermos de los viajes ocasionales, de las peregrinaciones religiosas que eran y siguen siendo tan populares en España, o de los pobladores que vivían cerca de los monasterios y de las abadías.

Esta es la razón principal por la que los primeros religiosos franciscanos que llegan a estas tierras michoacanas, alentados por la experiencia de su patria, determinan sabia y humanitariamente construir Albergues-Hospitales a los que los indios llamaron "Huatápera", voz tarasca que según la versión de los señores Gutiérrez Govea que han dedicado por muchos años su atención particular a La Huatápera de Uruapan, y de muchos lingüistas purhépechas, significa: "Lugar de reunión, sitio donde se pueden reunir o a donde pueden llegar" (HURTADO, 2000: 10).

Según cronistas de la ciudad, Fray Juan de San Miguel arribó a esta ciudad de Uruapan allá por el año de 1533. Reorganizó a varios de los pueblos tarascos que estaban enclavados en la meseta y fundó otros muchos que aún perduran, como San Miguel el Grande, hoy conocido como San Miguel Allende. Entre los trabajos realizados por el fraile destacan: la orientación que dió a la producción de la artesanía, el trazo urbano de la población y el establecimiento de nueve barrios: San Miguel, San Francisco, La Magdalena, La Trinidad, San Juan Evangelista, San Pedro, Santiago, Los Reyes y San Juan Bautista, de los cuales perduran ocho hasta el momento (MORENO DUARTE, 1987: 2-10). Instituyó



<p style="text-align: center;"><b>TESIS CON FALLA DE ORIGEN</b></p>
---

los hospitales que fueron de grandísima utilidad en nuestra ciudad y eran considerados como un refugio, casa o un lugar de hospedaje a donde podían acudir los pobres; también incluía una clínica, donde los enfermos eran atendidos, pero ante todo se perseguía la instrucción religiosa de los indios (FLORESCANO, 1989: 78,87).

Fundó La Huatápera el mismo año de la fundación hispánica de esta ciudad, 1533, con el fin de que en ella se atendieran las necesidades de salud de los indios, y a aquellos que fueron recogidos de cuevas y barrancos en donde se hallaban escondidos por el temor que tenían a los españoles, que invadían vandálicamente la región de Michoacán y de Uruapan. Estos eran recintos empleados como albergue para quienes tenían necesidad de pernoctar al viajar de unas latitudes a otras y en donde, además, podían solicitar agua y alimentos porque sabían que no se les negaría esa petición de elemental humanidad.

Debido a la geografía del Estado, y para el caso de Uruapan y sus alrededores, puesto que se puede denominar como una zona eminentemente sísmica fue un factor determinante para elegir un tipo de arquitectura baja y a su vez ligera.



*Página Anterior: Fig. 4: Vista posterior de La capilla. Fotografía propia.  
En esta página: Fig. 5: Corredores de la Huatápera. Fotografía propia.*

Aquí en Uruapan, la primera tarea de Fray Juan de San Miguel y de sus primeros indios reunidos, fue la construcción de un rústico techo para pasar las primeras noches y atender a los enfermos, base de lo que sería, sin duda y ahí mismo, lo que conocemos como La Huatápera incluyendo una techumbre semejante para los primeros rituales religiosos cristianos, al mismo tiempo que iniciaba la construcción de la iglesia de San Francisco y la de una modesta capilla en la que realizarían sus oficios religiosos, y a la que le dio el nombre de "Nuestra Señora de La Purísima Concepción" (nombre que se dio también al convento, ya que fue designada como patrona del mismo) edificada en lo que

ahora es el Santuario de idéntico nombre, al oriente de La Huatápera (HURTADO, 2000: 10, 11).

Sin embargo, no sólo se utilizó para lo que estaba destinado, sino que había habitaciones en donde residían los elementos dirigentes de los antiguos habitantes ("cargueros"). Así mismo, dentro del mismo edificio vivían las doncellas encargadas del cuidado de los enfermos, del ornato y del aseo del edificio, ayudadas por los "semaneros", que eran indígenas nombrados semanalmente (OCHOA, 1997: 20). Entre otros usos se sabe que sirvió como centro de reuniones de cabildo, como escuela pública y dio albergue a un centro de agraristas.



## 1.3 Construcción

Este hospital se construyó en la parte central de lo que fue un centro de reunión purhépecha del cual se aprovecharon las plataformas y materiales de construcción, sobre todo la piedra brava muy usual desde épocas prehispánicas. Para determinar la forma definitiva debieron tomarse en consideración varios factores que en las prácticas anteriores no lo fueron, ya que se tienen antecedentes de que las poblaciones se amontonaban en torno a éstos hospitales protectores de una manera poco conveniente, a ello se debe la disposición que tiene el edificio.

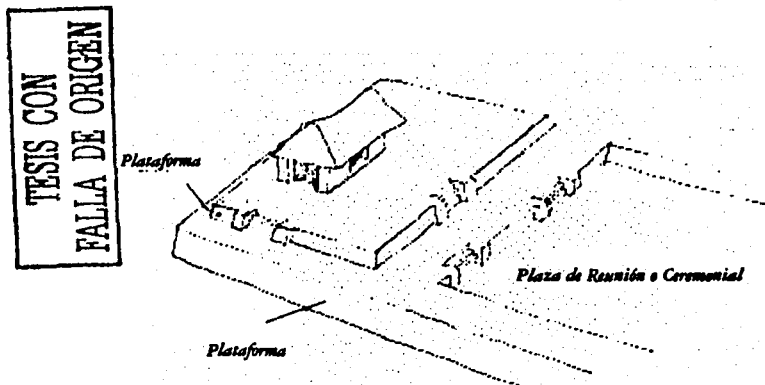


Fig. 6: Reconstrucción hipotética del núcleo prehispánico de la Huastépeca. Fuente: FERNÁNDEZ, 1999: 24.

El monumento ha conservado en forma aceptable, a pesar del paso del tiempo, muchas de sus características principales no obstante que su entorno urbano ha sufrido serias alteraciones que modificaron su apariencia.

Se cree que cuando se planeó la ubicación del conjunto se consideraron las estructuras existentes, ya

que si se observa la fachada de la capilla se puede advertir una escalinata un poco forzada debido a que sus huellas y peraltes son un tanto empinados, lo cual nos remonta a las escalinatas prehispánicas empleadas en sitios ceremoniales. La ubicación del conjunto es una parte elevada respecto a la topografía de la zona, permitiendo una ventaja visual relevante.

La funcionalidad de los hospitales de este tipo consistía en la construcción de una pequeña capilla con unas alas anexas de cuartos, y en torno a ellas un atrio o gran patio en donde realizar actividades al aire libre (FERNÁNDEZ, 1999: 25-27).

El hospital en su primitiva estructura era un gran paralelogramo de dos pisos rectángulo circunscrito por las calles de Vasco de Quiroga, 2ª. del Beaterio, 1ª. de las Camélias y por la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

plaza fray Juan de San Miguel. En su interior tenía un gran patio limitado al norte por un ala del edificio con habitaciones que daban a un corredor, al oriente por la Iglesia del hospital y su sacristía, al sur por una cerca de piedra en la que se hallaba la puerta de entrada al hospital o Huatápera; y al poniente por la capilla del Santo Sepulcro y otra ala del edificio que en ángulo recto se unía con la del norte, y que como ésta tenía un corredor al que daban las habitaciones destinadas a hombres y mujeres con separación para infecciosos y a las enfermeras. Este patio era llamado por los indios patio de las cocinas por las que en él tenían los cargueros que vivían en el hospital. "En la parte norte del paralelogramo... estaba un gran solar anexo al hospital y en el cual vivían los indios semaneros...".

"La capilla del Hospital dedicada a la Inmaculada estuvo situada enfrente y como a nueve metros de la cruz de piedra que aún se conserva en el patio del hospital y tenía diez metros de ancho por veinte de largo, aproximadamente. Toda ella era de piedra, de muy buena fábrica, y en sus principios sirvió de parroquia durante varios años. Su situación era

de oriente a poniente, el altar mayor dedicado a la Purísima Concepción estaba al lado oriente y la puerta principal daba al poniente, al lado de la cruz, teniendo además otra puerta al lado sur de la cual daba a un reducido atrio de cuatro metros de anchura por veinte de longitud. Tenía un pequeño coro y sacristía y dos campanas, que por carecer de torre la capilla, estuvieron muchos años colgadas en el corredor norte del hospital las cuales fueron fundidas para hacer una de las que ahora se encuentran en la torre de la parroquia. La imagen de la Purísima Concepción, patrona del hospital, era una bella escultura que fue retocada y ahora se encuentra en la nueva iglesia".

En el ángulo suroeste del hospital y con vista a la plaza, se encuentra la capilla del Santo Sepulcro... mide diez metros ochenta centímetros de ancho y tiene en su portada un arco de medio punto con pilastras de piedra labrada, ricamente ornamentados, y en la parte superior una hornacina o nicho con una estatua de San Francisco de Asís, tallada en piedra. A ambos lados de la hornacina hay dos escudos también de piedra, uno de la orden franciscana con las cinco llagas, los tres clavos y la corona de espinas; y el otro fue el escudo de los reyes de España

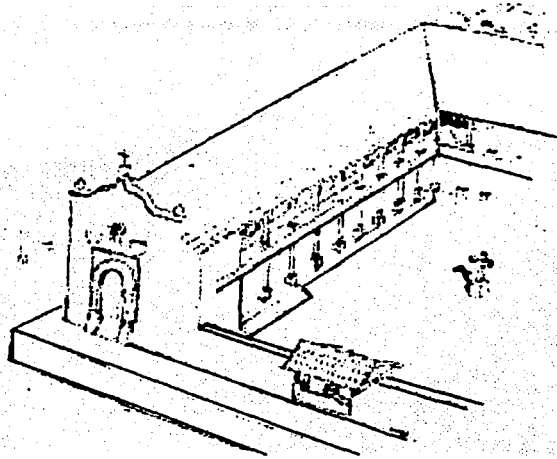
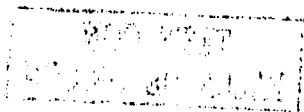


Fig 7: Reconstrucción hipostática de la Huatápera, siglo XVI. Fuente: FERNÁNDEZ, 1999: 26.

## Antecedentes Históricos



y del cual únicamente se conserva la corona pues al igual de sus similares, fue destruido en los primeros años de nuestra independencia (MIRANDA, 1979: 84).

Aquí en Uruapan, La Huatápera es la construcción arquitectónica más antigua en que participaron con su mano de obra los indígenas, además de que se debió recurrir a reclutar mano de obra de diferentes sitios por la dimensión de la obra. Este Hospital de Indios, uno de los primeros que se fundaron en América Latina, se erigió en una de las manzanas centrales, frente al lado oriental de la gran plaza que entonces existía y que por la construcción de los "portales", quedó dividida en tres, cuyos nombres en la actualidad son los siguientes: la oriental, que se llama "Fray Juan de San Miguel", la del centro "Miguel Rincón", y la del lado occidental, "Jardín de los Mártires". En la misma manzana en que se construyó el hospital también se levantó el convento y una pequeña capilla conocida con el nombre de "Santo Sepulcro".

La fachada de la capilla del Santo Sepulcro pertenece al estilo plateresco, aquél que florece en España desde fines del siglo XV, cuando los reyes católicos unifican España y Carlos V extiende sus dominios. La portada de La Huatápera pertenece al grupo que llevan las jambas, arcos y enjuntas muy decorados, se

distinguen por una especial finura del relieve, pero en cuanto a los alfices se nota la fuerte influencia mudéjar. En general, los ornamentos son una imitación de conchas y veneras, símbolos del bautismo. Otro detalle interesante son sus pilares, pues todos ellos son monolíticos, lo cual demuestra una construcción nada común para aquellos tiempos (MORENO, 1987: 10, 11). En el remate de la fachada hay dos escudos, que simbolizan a los frailes franciscanos del siglo XVI. El escudo de la izquierda de la fachada es el símbolo de las cinco llagas de Cristo, en tanto, el de la derecha se encuentra vacío, pero se cree perteneció al escudo de España, el cual fue retirado después de la lucha de Independencia (FERNÁNDEZ, 1999: 32).

No puede negarse la influencia un tanto española, que trajeron consigo los conquistadores de la Nueva España, en la construcción del edificio; sin dejar atrás la adaptación que hizo el indígena al método arquitectónico que le fue enseñado. "Al hablar de la La Huatápera es mencionar sin duda alguna la joya histórica y arquitectónica de mayor valor con que cuenta Uruapan". Es sin duda alguna el primer edificio construido si



Fig. 8: Capilla del Santo Sepulcro. Fotografía propia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

consideramos, como debe ser, sus más sencillos inicios (HURTADO, 2000: 11).

Hubo diferentes tipos de vivienda usados en la antigüedad que se distinguieron por la forma de su techo, ya que algunas las tenían de dos aguas y otras en forma cónica, todos con bastante pendiente para evitar daños por la abundancia de lluvias en la región. En la construcción de los templos se usó la piedra, las yácatas eran de forma variada: circular, cuadrada o rectangular en su base, con relieves de diferentes formas y motivos. (GUTIÉRREZ, 1994: 29).

En el siglo XVI se tuvo la necesidad de adecuar las formas de trabajo a nuevas técnicas y organización del trabajo, así como los nuevos materiales. Los materiales que conforman el edificio reflejan que la estructura es sólida, al igual que el subsuelo, ya que no presenta problemas estructurales por hundimientos diferenciales.

Los muros del conjunto son básicamente de piedra braza en las partes bajas de mayor responsabilidad estructural, adobe de excelente calidad o ladrillo de barro. En su mayoría tienen un espesor de 85 centímetros.

Las cubiertas utilizan el sistema de tapanco con cubiertas planas de entablado o de tejamanil soportadas con vigas que descansan sobre las gualdras longitudinales que hacen la función de dadas de repartición. Sobre las vigas se colocaba el entablado o el tejamanil y sobre este piso la estructura superior en la que se pueden observar los arrastres, las vigas y el caballete de madera. Entre cada viga están las fajillas sobre las que se coloca el tejamanil o las tejas de barro.

Este sistema de piso está soportado por sobrias columnas del siglo XVI hechas a base de piedra braza sobre una base en forma de dado. Sobre las columnas se apoya una ménsula que distribuye equitativamente las cargas sobre las columnas.

La estructura en conjunto presenta una gran solidez por la continuidad de los materiales, para lo cual se emplearon mezclas diferentes: los adobes están unidos con el mismo barro de su fabricación, o usando tierras como la charanda o cal en piedra, éste último aplicable en recubrimientos de muros y pinturas, entre otras (FERNÁNDEZ, 1999: 43-46).



Fig. 9 y 10: Arriba: Cubierta plana del entablado, abajo: Columnas de piedra braza. Fotografías propias.

## 1.4 Daños y Modificaciones

Podemos darnos cuenta fácilmente de las diversas transformaciones que ha sufrido el Hospital de La Huatápera a lo largo de sus más de 450 años de existencia, entre ellas está la supresión de una segunda planta, probablemente en el siglo XIX, debido quizás al abandono al que fue sometido después del siglo XVIII; además de la eliminación de la barda atrial, en los años cincuenta del siglo XX, y el cambio realizado a la cubierta de la capilla y del corredor de planta alta que tenía inicialmente una sola inclinación.

La capilla primitiva de la Purísima Concepción que estaba construida de Oriente a Poniente se derribó en 1890 para edificarse la actual de Norte a Sur; el muro y la puerta de entrada fueron retirados y bien podía haber sido remodelados y modernizados; la barbarie revolucionaria incendió una parte del edificio junto a las celdas que se conservan al frente y junto a la capilla de Santo Sepulcro; alguna autoridad ávida de ingresos económicos, de ingresos improcedentes, inadmisibles, abrió algunas puertas por la calle Vasco de Quiroga para dar en arrendamiento tres

habitaciones, lo cual ocurrió por la década de 1920 (HURTADO, 2000: 11). También se tienen noticias de un incendio ocurrido en el siglo XIX (1813) como señala Kubler (FERNÁNDEZ, 1999: 29).

Podemos percatarnos de un sistema constructivo incompleto en el tapanco de la sala anexa a la capilla (sala de convalecencia), que consiste básicamente en un muro cortado en donde se apoyan las vigas y sobre ellas el tejamanil del entepiso, que se supone debió tener encima un piso de madera correspondiente al de la planta alta.

Algo más bárbaro fue la destrucción de dos puertas y dos ventanas del corredor poniente con el mismo fin mencionado, cuando esas puertas tenían tal estilo y tal belleza morisca, como aún se puede apreciar alguna; la cruz de piedra labrada en una sola pieza que ocupa el centro del patio central se recorrió al lado oriente.

El gran tesoro artístico que representa la capilla del Santo Sepulcro que está a punto de extinguirse; pero los puestos de los comerciantes semifijos y ambulantes que rodean al edificio más noble,



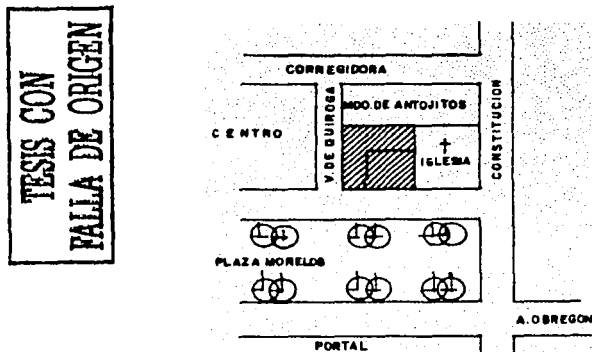
*Fig. 11: Vista de la Huatépera. Fotografía propia*

más antiguo y más digno de nuestra ciudad, ahí donde fuera el centro de la vida social, religiosa y política de nuestro entorno y donde su suelo y sus muros nos hablan del fundador de Uruapan y del primer obispo de Michoacán Don Vasco de Quiroga, ambos ahí fallecidos, la denigran y le van dando muerte paulatinamente.

Hoy en día se conserva éste edificio recientemente remodelado como Museo de Arte Popular al servicio del Instituto Nacional Indigenista para fomento de las diversas manifestaciones de la cultura purépecha, desde el año de 1956 bajo decreto del presidente. Este monumento de carácter histórico debe ser conocido con más interés y responsablemente resguardado por los uruapenses, los michoacanos y por todos los que aman la tradición, la historia y la cultura, pilares de la identificación y del cariño de lo que es nuestro. (HURTADO, 2000: 12).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# 1.5 Situación Actual

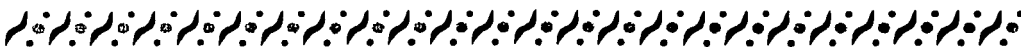


Figs. 12 y 13: Arriba: Croquis de la ubicación de la Huatápera. Abajo: Croquis de la disposición del centro de la ciudad en 1937. Fuente: PAREDES, 2001: 2.

La Huatápera se ubica en el costado nororiental de la Plaza de los Mártires de Uruapan, delimitada por dos calles laterales que desembocan en la plaza. La esquina poniente presenta la fachada de la capilla del Santo Sepulcro, mientras que en el costado derecho se encuentra el antiguo atrio del hospital sin sus bardas (FERNÁNDEZ, 1999:35).

El atrio, y todo el conjunto en general, se eleva por encima del nivel de la calle aproximadamente un metro, sobre el cual se hallaba una fuente de planta circular, recientemente eliminada, y otra plataforma elevada simulando un foro; junto a este se localiza una cruz de piedra braza que data del siglo XVI y se cree que su posición actual no es la original, que debió ser en el centro del atrio y no a un lado.

Las alas del conjunto en forma de L definen la forma cuadrangular del atrio, cuyos corredores están cubiertos por techos a dos aguas apoyados en columnas labradas de piedra que a su vez sirven de base para las ménsulas de madera que reciben encima traveses de madera que soportan un sistema de vigas horizontales sobre las que se desplantan los techos de teja inclinados. Sólo la parte anexa a la capilla consta de dos niveles, y a partir de la cual se reduce a un solo nivel, presentando similar sistema constructivo. Existe una escalinata que permite el paso hacia los corredores que conducen a las diferentes salas, que contienen puertas y ventanas en forma sucesiva.



Esta serie de puertas y ventanas sucesivas a lo largo del corredor que dan acceso a las distintas salas, las cuales tienen la característica de un abocinamiento hacia el corredor.

La capilla del Santo Sepulcro es sin lugar a dudas el elemento central del conjunto, sus dimensiones son muy pequeñas y está dividida en dos partes: la nave y el presbiterio. El sistema de techo es a base de madera sobre las gualdras a manera de cordón que corren a lo largo de los muros longitudinalmente y existen unas ménsulas sobre las que descansan las vigas de madera que se apoyan perpendicularmente en los muros y sobre ellas el entablarado que cubre el espacio.

Los pisos son de piedra braza o de recinto negro, cuya característica porosidad no aísla la humedad del subsuelo de las salas.

Desde la cocina se puede acceder a un patio cubierta por un tejabán apoyado sobre cuatro columnas de madera con

bases y capitel de madera labrada. En la parte norte se aprecia una bodega cubierto con un techo de vigas de madera y entablarado, de una altura mayor que las salas (FERNÁNDEZ, 1999: 7-41).

A continuación se presenta un plano visto en planta y en cortes del edificio en cuestión, así como un croquis de la disposición de la cubierta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

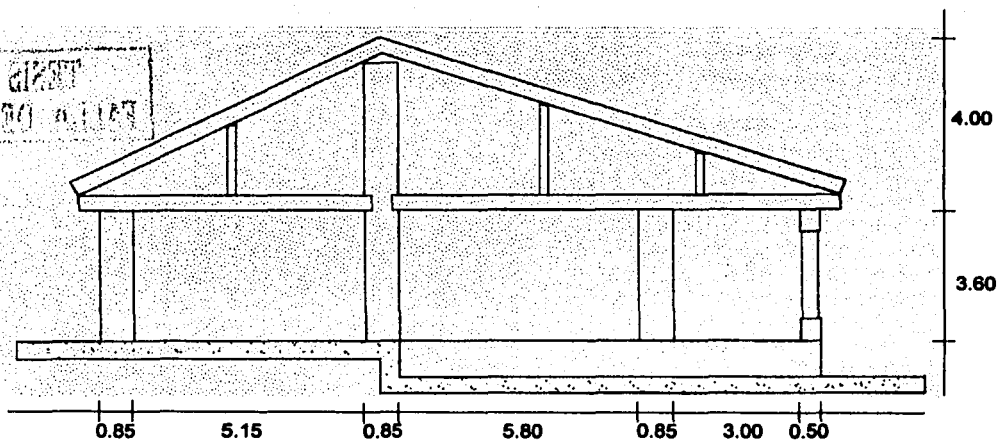


Fig. 14. Vista lateral de la Capilla del Santo Sepulcro. Fotografía propia.



Antecedentes Históricos

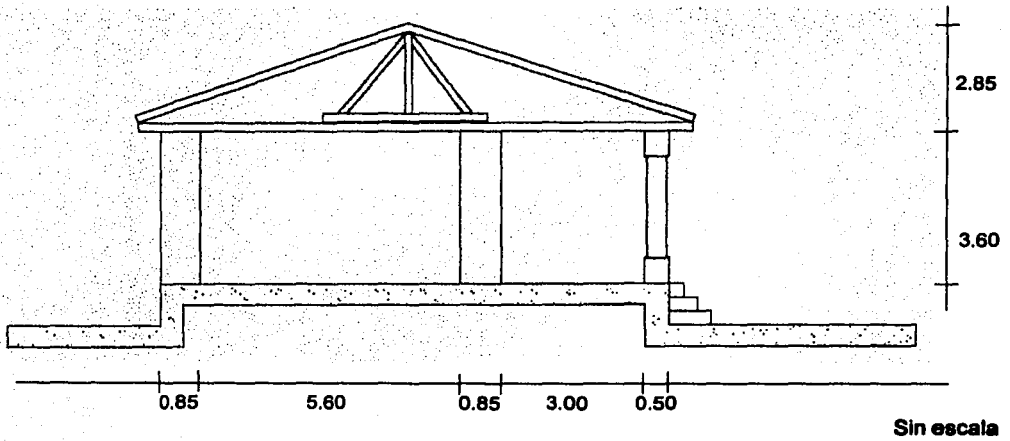
# Croquis de la Cubierta Norte-Sur



Sin escala

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Croquis de la Cubierta Poniente-Oriente



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PLS FIRST  
NAME TO ALL



# Capítulo 2

## Sismos Históricos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

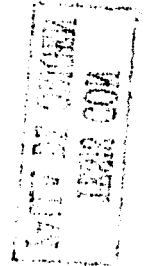
28

NOV 21 1957  
RECEIVED BY ALLAN

## 2.1 Origen de los Sismos

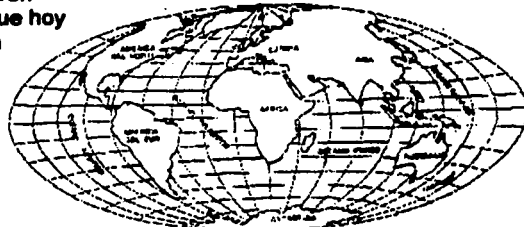


En este capítulo nos enfocaremos a definir el concepto de sismo, pues representan la causa del mayor número de fallas y daños en las estructuras, además analizaremos las características más importantes de los sismos que se han presentado en nuestra región y las repercusiones que se tienen registradas.



**Sismo:** Es aquel movimiento de la Tierra causado por una liberación brusca de energía elástica acumulada durante un largo tiempo en la corteza terrestre.

Se tiene como antecedente la teoría de la deriva continental propuesta a principios del siglo XX (1912) por Alfred Wegener, aunque ya había sido sugerida en el siglo XVII por Sir Francis Bacon y en el siglo pasado por Antonio Schneider, quien sostenía que hace unos doscientos millones de años todos los continentes estaban unidos en una enorme masa continental a la que denominó Pangea, la cual comenzó a fragmentarse a principios de la era Mesozoica y posteriormente iniciaron un lento deslizamiento sobre un supuesto manto líquido. Estas ideas quedaron plasmadas en lo que hoy se conoce como la teoría de la tectónica de placas.



*Figs. 18 y 19: Desplazamiento de los continentes desde hace doscientos millones de años a la actualidad; arriba, estado inicial, abajo, estado actual.*  
Fuente: MARTÍNEZ, 2000:7-9.

## Sismos Históricos

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Se le ha dado el nombre de **placas a las áreas de la superficie terrestre delimitadas por ciertos cinturones orogénicos, en los cuales se concentra la mayor parte de la actividad sísmica y volcánica del mundo.**

Esta teoría establece que la corteza terrestre está conformada por unas 17 placas que se desplazan unas de otras debido a las corrientes de convección que se generan en el manto. Estas placas se están acomodando en un proceso que lleva millones de años y han ido dando la forma que hoy conocemos de la superficie de nuestro planeta, originando los continentes y los relieves geográficos. Habitualmente estos movimientos son lentos e imperceptibles, pero en algunos casos estas placas

chocan entre sí impidiendo su desplazamiento y entonces una placa comienza a desplazarse sobre o bajo la otra, originando lentos cambios en la topografía, pero si el desplazamiento es dificultado, comienza a acumularse una energía que en algún momento se liberará y una de las placas se moverá bruscamente contra la otra, rompiéndola y liberándose entonces una cantidad variable de energía que origina el sismo.

Otra causa a la que es atribuible el origen de los sismos es la actividad subterránea producida por un volcán en proceso de erupción. También se ha estimado que una fuerza externa o accidental, provocada por el hombre, podría desencadenar un pequeño sismo: experimentos nucleares.

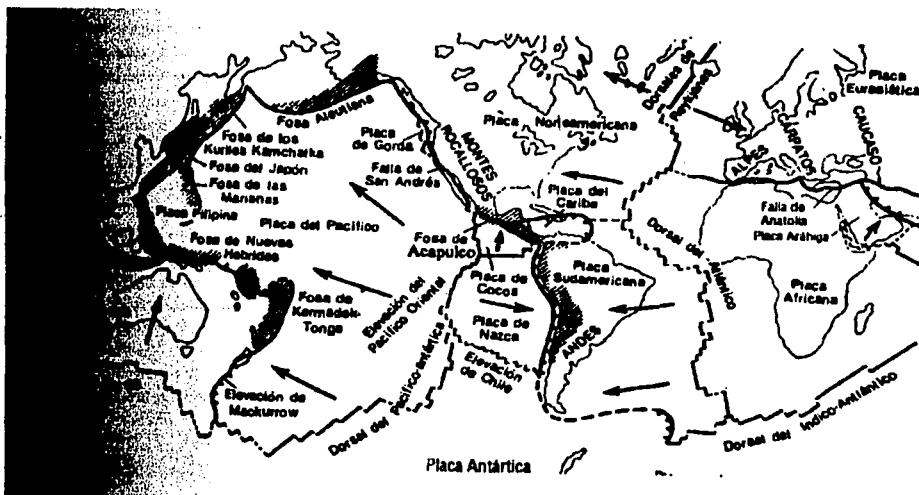


Fig. 20: Mapa de las placas tectónicas mayores. Fuente: PAVÓN, 1998: 19.





## 2.2 Tipos de Sismos

Los sismos se pueden clasificar con base en su origen como naturales o artificiales. Los primeros pueden ser de tres tipos: Sismos tectónicos, producidos por la interacción de placas tectónicas, sismos volcánicos y sismos de colapso, generados por el derrumbamiento del techo de cavernas y minas. Los sismos artificiales son los producidos por el hombre por medio de explosiones con fines de exploración, investigación o explotación de bancos de materiales.

Los movimientos que presentan las placas entre sí se pueden clasificar como:

- **DIVERGENTES:** En donde las placas se están separando y se genera una abertura entre ellas, además de que se suele producir una elevación dando lugar a la formación de grandes cadenas montañosas como la del Himalaya.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- **CONVERGENTES O DE SUBDUCCIÓN:** Donde una de las placas se introduce debajo de otra, como es el caso de la placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica en la costa occidental de nuestro país.

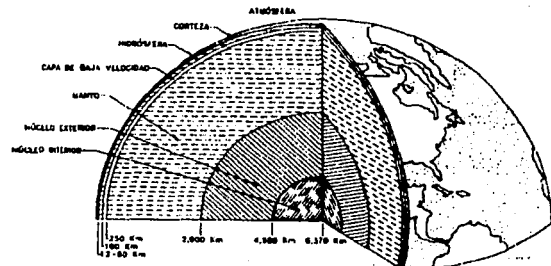


Fig. 21: Corte del globo terrestre que muestra los diferentes estratos que lo forman. Fuente: PAVÓN, 1998: 105.

- **TRANSCURRENTES O DE TRANSFORMACIÓN:** Cuando la dirección del movimiento de dos placas continentales es similar sin que haya creación o destrucción de litósfera, es decir, se mueven entre sí lateralmente como es el caso de la falla de San Andrés.

## Sismos Históricos

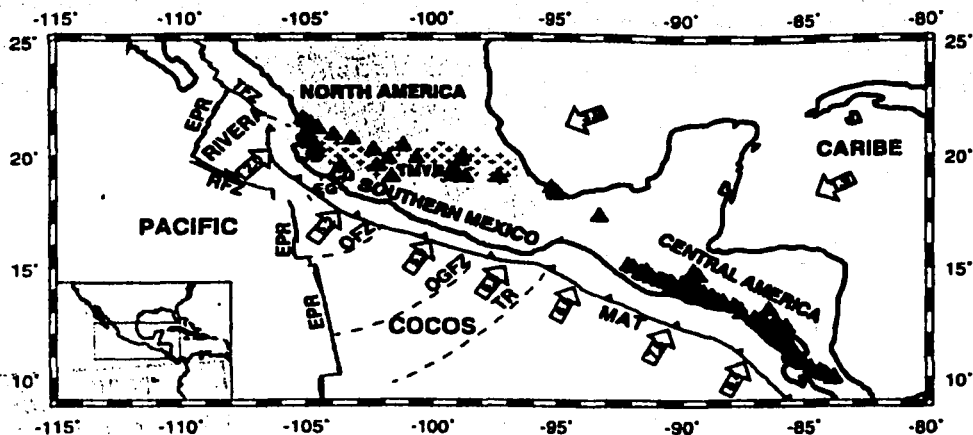


Fig. 22: Subducción de la placa de Cocos y de Rivera. Fuente: PARDO, 1995: 12, 375.

Otro tipo de sismos son los denominados por FALLAMIENTO NORMAL, que se producen a grandes profundidades por el rompimiento de la placa subducida dentro del magma. Al penetrar la placa de Cocos debajo del continente se generan deformaciones, causados por el esfuerzo gravitacional de la placa de Cocos cuyo peso es mayor a la astenósfera circundante, que producen sismos cuyos epicentros se localizan más al interior del continente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En México la mayoría de los sismos de gran magnitud ocurren por la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica, debido a que en este tipo de zonas la litósfera tiene un mayor espesor, es rígida, relativamente fría y el área potencial de ruptura es mayor.

## 2.3 Características de los Sismos

Los deslizamientos que se producen entre las placas, generadores de sismos, no ocurren en intervalos de tiempo específicos o constantes; puede ocurrir un sismo en un periodo breve de tiempo posterior a un sismo ya experimentado o en su defecto pueden pasar varias décadas, durante las cuales hay una gran acumulación de energía, antes de que se presente un corrimiento de las placas en esa zona. Por tal motivo se ha

analizado la sucesión que han tenido los sismos en varias zonas de subducción para identificar las *brechas sísmicas*, es decir, zonas sísmicamente activas que después de un largo periodo han permanecido quietas, sin experimentar liberación alguna de energía y en las que es probable se presente en un futuro próximo un sismo de magnitud apreciable.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

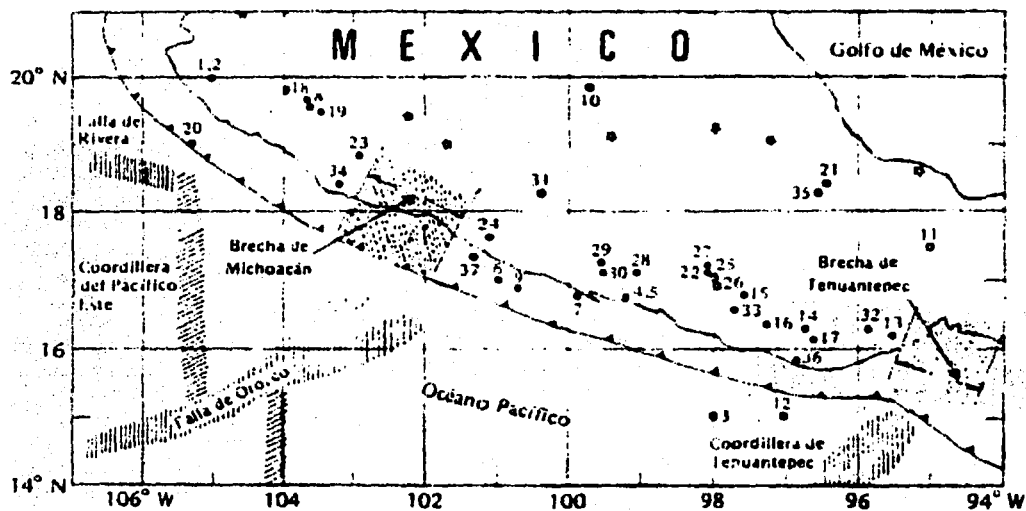


Fig. 23: Brecha sísmica de Michoacán.  
Fuente: HERRERA, 1986: 32.

## Sismos Históricos

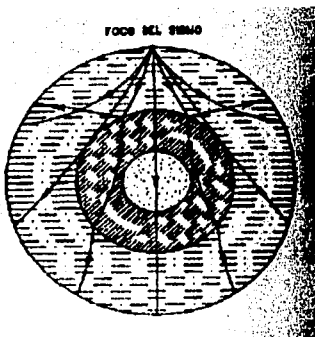
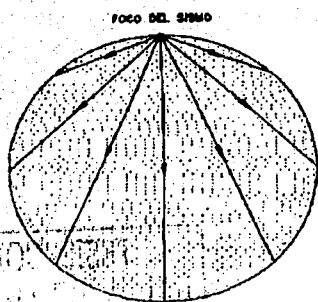


Fig. 24: Si la Tierra tuviera propiedades uniformes al transmitirse la energía sísmica en todas direcciones a partir del foco, las trayectorias seguirían líneas rectas y su velocidad sería constante. El otro esquema revela las capas concéntricas en que la Tierra está dividida.

Fuente: PAVÓN, 1998: 106.

La energía liberada produce ondas en la corteza terrestre que se transmiten a grandes distancias y provocan la vibración de la superficie del suelo. Estas ondas son irradiadas desde el *foco* o *hipocentro* en todas direcciones. Debido a esto, los sismos se pueden clasificar en superficiales, intermedios o profundos, dependiendo de la distancia de la corteza al hipocentro, si ocurre hasta 50 km. de profundidad es del tipo superficial; si se desarrolla entre los 50 y 300 km. se denomina intermedio y mayor a 300 km. profundo. La proyección del hipocentro en la superficie se conoce como *epicentro*, siendo el punto de la superficie terrestre donde la intensidad es mayor.

De la energía liberada en un sismo por medio de ondas ésta solo representa un mínimo porcentaje del total de la energía acumulada, pues la mayor parte de ella se libera en forma de calor.

Al ocurrir un sismo éste es producido por tres tipos básicos de ondas, de las cuales sólo dos se propagan a través del medio sólido de la Tierra en todas direcciones y que comúnmente se conocen como *ondas internas* o *de cuerpo*. El tercer tipo de onda es la que se propaga por la superficie terrestre y se denominan *ondas superficiales*.

De las ondas internas se distinguen las *ondas primarias* u *ondas P* a las cuales también se les conoce como ondas longitudinales o de compresión y tienen la particularidad de que hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas, en ocasiones pueden percibirse como un sonido grave y profundo, viajan a mayor velocidad, tienen frecuencias más altas y amplitudes menores que las *ondas S*, las cuales se dice son las causantes de daños en las construcciones, pues hacen vibrar una partícula en

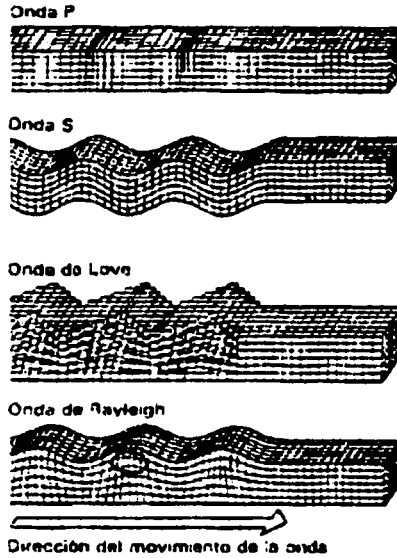
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas sacudiendo la superficie del suelo vertical y horizontalmente.

Las ondas superficiales se dividen en dos grupos: las ondas love u ondas L, las cuales deforman las rocas de forma similar que las ondas S, y las ondas Rayleigh u ondas R, que tienen un movimiento vertical semejante al de las olas del mar. Cabe mencionar que cerca de la falla los tres tipos de ondas están superpuestos, pero a distancias grandes de la falla se distinguen los tres trenes de ondas porque llegan en tiempos diferentes. Cerca del epicentro la componente vertical es significativa y puede percibirse como un movimiento trepidatorio; a medida que se alejan del foco predominan los periodos de onda largos, mientras la componente vertical es poco significativa y las personas experimentan un movimiento ondulatorio de periodo largo.

El periodo natural de vibración es muy importante en las estructuras puesto que si el periodo de vibración del terreno se iguala al de la estructura ésta puede entrar en resonancia. Los edificios bajos y rígidos son más vulnerables a sismos de foco cercano, mientras que los edificios altos y flexibles que tienen periodos de vibración largos son más susceptibles de daños a sismos de foco lejano.

Fig. 25: Tipos de Ondas Sísmicas. Fuente: MARTÍNEZ, 2000; 14.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

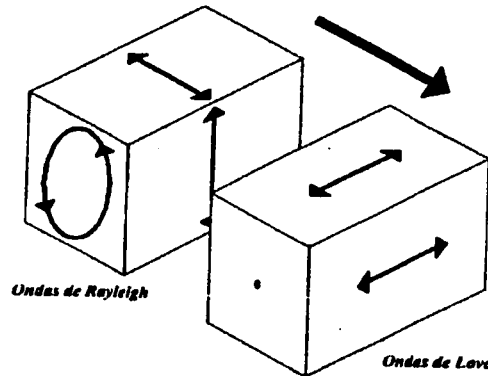


Fig. 26: Movimientos de las Ondas Superficiales. Fuente: PAVÓN, 1998: 7.

## Sismos Históricos

I	No sentido por las personas; registrado por los instrumentos sismográficos.
II	Sentido solo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos superiores; objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en pisos superiores; pero muchos pueden no reconocerlo como temblor; vibración semejante a la producida por el peso de un vehículo liviano; objetos suspendidos oscilan.
IV	Objetos suspendidos oscilan visiblemente vibración semejante a la producida por el peso de un vehículo pesado; vehículos estacionados se bambolean; cristalería y vidrios suenan; puertas y paredes de madera crujen.
V	Sentido aún en el exterior de los edificios; permite estimar la dirección de las ondas; personas dormidas se despiertan; el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se puede derramar; objetos inestables son desplazados; las puertas giran y se abren o cierran; relojes de péndulo se paran.
VI	Sentido por todas las personas; muchos sufren pánico y corren hacia el exterior; se tiene dificultad en caminar establemente; vidrios y vajilla se quebran; libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes; los muebles son desplazados o volcados; los aplanchados de mortero de mala calidad y mampostería tipo D se fisuran; suenan las campanas pequeñas.
VII	Se tiene dificultad en mantenerse parado; percibido por los conductores de vehículos en marcha; daños y colapso de mampostería tipo D; algunas grietas en mampostería tipo C; las chimeneas se fracturan a nivel del techo; caída de aplanchados de mortero, tejas, cornisas y parapetos sin anclaje; algunas grietas en mampostería de calidad media; suenan las campanas grandes; ondas en embalses y depósitos de agua.
VIII	La conducción de vehículos se dificulta; daños de consideración y colapso parcial de mampostería tipo C; algún daño en mampostería tipo B; ningún daño en mampostería tipo A; caída del aplanchado de mortero y de algunas paredes de mampostería; caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados; algunas ramas de árboles se quebran; cambio en el flujo o temperatura de pozos de agua; grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados.
IX	Pánico general; construcciones de mampostería tipo D totalmente destruidas; daño severo y aún colapso de mampostería tipo C; daño de consideración en mampostería tipo B; daño a cimentaciones; daños y colapso de estructuras a base de marcos resistentes a momento; daños en embalses y depósitos de agua; ruptura de tubería enterrada; grietas visibles en el terreno.
X	La mayoría de las construcciones de mampostería y a base de marcos resistentes a momento son destruidas; algunas construcciones de madera de buena calidad dañadas; puentes destruidos; daño severo a presas, diques y terraplenes; grandes deslizamientos de tierra; se produce oleaje en los bordes de ríos, lagos y embalses; rieles de ferrocarril deformados ligeramente.
XI	Los rieles de ferrocarril deformados severamente; ruptura de tuberías enterradas.
XII	Destrucción total; grandes masas de roca desplazadas; líneas de mira distorsionadas; objetos lanzados al aire.
<b>Definición de los tipos de mampostería:</b>	
<b>Tipo A:</b>	Buena calidad de ejecución, mortero y diseño; reforzada y confinada empleando acero de refuerzo; diseñada para resistir cargas laterales de sismo.
<b>Tipo B:</b>	Buena calidad de ejecución; reforzada, pero no diseñada específicamente para resistir cargas laterales de sismo.
<b>Tipo C:</b>	Calidad de ejecución media; sin refuerzo y no diseñada para resistir cargas laterales.
<b>Tipo D:</b>	Materiales de baja resistencia, tal como el adobe; baja calidad de ejecución; débil para resistir cargas laterales.

Es necesario distinguir dos conceptos fundamentales en este campo pues frecuentemente son confundidos: la *intensidad* y *magnitud* de un sismo. El primero es una medida de los efectos que éste produce en un sitio dado y de su potencial destructivo; es una medida muy subjetiva pues depende de la apreciación de cada persona. Se han propuesto diversas escalas para medir la intensidad, siendo la más común la Escala de Mercalli Modificada. La magnitud es una medida del tamaño del sismo, es independiente del sitio de observación y tiene que ver con la cantidad de energía liberada. Se tiene una variedad de escalas de magnitud de las cuales las más usadas son la magnitud de ondas de superficie ( $M_s$ ) y la magnitud de ondas de cuerpo ( $M_b$ ). (MARTÍNEZ, 2000: 10-22)

Cuadro 1: Escala de intensidad de M.M.  
Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 85-86.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.4 Sismos Relevantes en Michoacán

La investigación de sismos históricos tiene un componente sísmológico y otro de carácter social. La finalidad, desde un punto de vista sísmológico, consiste en conocer qué ocurrió durante un sismo en el pasado y de estas observaciones derivar la localización del suceso sísmico, la magnitud aproximada y otros parámetros asociados con ese temblor. Posteriormente, se pueden aplicar los resultados obtenidos de la investigación histórica al conocimiento de la actividad sísmica de esa ciudad o región, así como a una eventual evaluación estadística del peligro sísmico (SUÁREZ, 1998: 12).

Los habitantes de la Nueva España, en los siglos XVII y XVIII padecieron inundaciones e intensas sequías, acompañadas de fuertes lluvias, eclipses, cometas, incendios, epidemias, manifestaciones populares, escasez de víveres y temblores de tierra. Estos en ambos siglos, se sentían cada año, y en algunas ocasiones se repetían hasta tres veces al día; en otras, temblaba durante tres meses seguidos.

Don Francisco Sosa comentaba que en la capital de México era muy raro el año

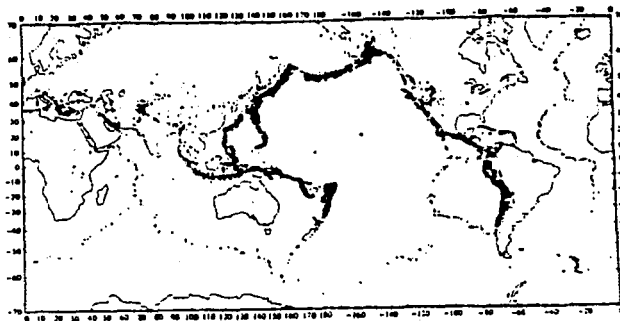


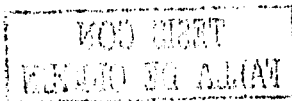
Fig. 27: Cinturón de Fuego del Pacífico o Cinturón Circunpácifico. Fuente: GENAPRED, No 2: 12.

que no se sentían temblores, los cuales podían ser considerados de tres clases, fuertes, medianos y tenues. Por cierto, en ese tiempo la intensidad de los temblores la medían rezando un credo; solían decir que el temblor había durado "dos o tres credos, rezados con devoción"; cuando duraban más del tiempo acostumbrado, se tocaba plegaria en las iglesias (SAN JUAN, 1987: 11).

Las costas del Pacífico mexicano y, particularmente, las del Estado de Michoacán forman parte del Cinturón del Fuego, llamado así por ser el lugar donde se generan los sismos y volcanes más violentos del mundo. Se localiza definiendo una franja en la periferia del Océano Pacífico.

Las regiones de Maravatío, Los Azufres, Queréndaro, Indaparapeo, Morelia y Pátzcuaro han estado sujetas a una serie de crisis sísmicas, que en tiempos históricos seguramente jugaron un papel importante en el desarrollo de las culturas precolombinas.

Adicionalmente, en el estado de Michoacán se localiza una zona volcánica, en donde se generan sismos que afectan a la región, la cual se puede dividir en dos: al oriente, donde el vulcanismo es más explosivo y con eventuales aparatos monogenéticos, y la Meseta Purhépecha donde la mayor actividad volcánica es de tipo monogenético, tipo Parícutín. Estas zonas han dado lugar a sismos que impactaron a la población, particularmente con



el nacimiento de los volcanes de Parícutín y el Jorullo (GARDUÑO, 1986: 57-59), volcán ubicado al suroeste de México, en el estado de Michoacán, al sur del lago de Pátzcuaro y cerca de Uruapan, en la sierra de Inguarán. El Jorullo se formó en 1759 con una violenta erupción que destruyó una fértil área agrícola.

Se tienen registros de sismos ocurridos en el estado de Michoacán desde el año de 1573. En 1759 se sintieron una serie de sismos por un periodo prolongado de tiempo, cinco meses, los cuales se anunciaban por un sonido subterráneo más o menos sordo hasta que el 29 de septiembre del mismo año se formó el célebre volcán de Jorullo.

Pátzcuaro ha padecido diferentes movimientos como en 1801 que ocasionó graves daños a la catedral de la ciudad. También el volcán de Colima causó grandes estragos en varias ciudades del estado como Morelia, Uruapan, Zamora, etc. en el año de 1837. En 1845 se sintió en la capital del estado y sus alrededores un temblor que duró de cuatro a cinco minutos, y se tienen datos que el agua contenida en algunas fuentes se derramó

y varias casas y templos se dañaron seriamente, como la caída de la torre de la iglesia de Pátzcuaro. Tres días después se repitió el fenómeno, pero su duración fue mucho menor.

En 1858 se sintió un terremoto considerado como uno de los más grandes de ese siglo, se le conoce como "Sismo de Santa Juliana", y fue reportado en todo el centro y sur de la república. También se atribuye una serie de sismos registrados en 1875 al volcán Ceboruco.

Es imposible ignorar el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en la brecha de Michoacán, ya que no se había presentado un sismo mayor desde 1800, se creía que el periodo de recurrencia de ésta zona era anormal en relación con otras regiones e incluso se llegó a pensar que se trataba de una brecha asísmica. Se sabe que gran parte de la energía acumulada en ésta región fue liberada a través de éste sismo.

A continuación se presenta una lista de temblores de gran magnitud, adaptada por el Dr. Shri Krishna Singh, ocurridos en Michoacán durante el siglo XIX y XX:

Cuadro No 2: Temblores de gran magnitud

Fecha:	Localización:	Magnitud:
25/marzo/1806	Costa Colima-Michoacán	7.5
31/ mayo/1818	Costa Colima-Michoacán	7.7
19/junio/1858	Norte de Michoacán	7.5
15/abril/1941	Michoacán	7.7
30/enero/1973	Michoacán	7.5
25/octubre/1981	Playa Azul, Michoacán	7.3
19/septiembre/1985	Frente a la Costa de Michoacán	8.1

FUENTE: SISMOS, No. 2, CENAPRED; 21.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



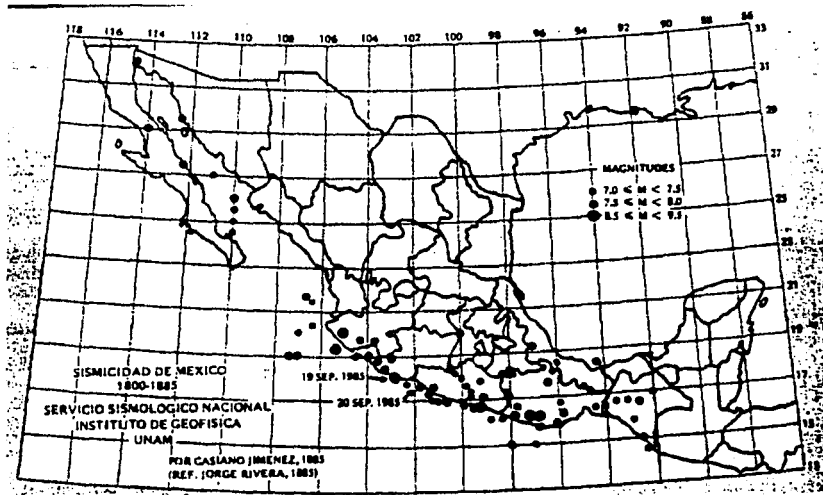


Cabe mencionar que la sismicidad de la República Mexicana se debe primordialmente a la subducción de la placa de Cocos y de Rivera bajo la de Norteamérica, alcanzando profundidades hasta de 100 km por debajo del Eje Neovolcánico, el cual es una consecuencia de la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Continental Americana y está formado por volcanes tan renombrados como el Parícutín, el Pico de Orizaba, el volcán de Colima y el mismo Popocatepetl. Producto de la subducción se genera otro fenómeno en el interior de la placa subducida, conocido como fallamiento normal o tensional, ya que por su mayor densidad se producen esfuerzos debidos a su peso propio que desencadena un sismo bajo las ciudades con una profundidad intermedia entre 50 y 70 km.

MOD. RIVERA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 28: Sismicidad de México de 1800-1985



## 2.5 Sismo del 19 de Junio 1858

### TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Daños y fuertes intensidades fueron reportadas tanto en el estado de Michoacán como en la Ciudad de México. Aunque un epicentro costero para este sismo no puede ser rechazado, los reportes concuerdan mejor con un evento de fallamiento normal, con una profundidad intermedia de alrededor de 50 km, en la placa de subducción de Cocos. Un cuidadoso análisis de los reportes de éste evento y otros eventos de fallamiento normal del altiplano mexicano sugieren una localización probable de 18.0° N, 100.8° W, a unos 220 km al SW de la ciudad. Su magnitud está estimada en 7.7 (SINGH, 1996: 1655).

Una sacudida inicial (trepidatoria), seguida de oscilaciones de N a S que cambiaron de E a W. El movimiento fue tan fuerte que la torre de la catedral pudo verse oscilando, los árboles parecían haber sido golpeados por un fuerte viento. El agua de las fuentes se vació. Todas las casas se vieron afectadas y muchos edificios tuvieron daños. En muchos lugares aparecieron grietas en la tierra, la mayoría con orientación N-S, y los bloques del pavimento se levantaron.

A las nueve y diez y siete minutos de la mañana se sintió en México un tremendo terremoto, que se considera como uno de los más fuertes de los

experimentados en el siglo. Se reportó en todo el centro y sur de la República. El movimiento fue al principio de trepidación, al que siguieron oscilaciones, primero de Norte a Sur y después de Este a Oeste.

Las oscilaciones fueron tan fuertes que se veían mover las torres de la catedral de la ciudad de México, los árboles de los paseos parecían agitados por el viento, y las fuentes quedaron casi vacías. La totalidad de las casas padecieron y muchos de los edificios también sufrieron bastante, entre ellos el Palacio, la Casa del Ayuntamiento, el Teatro Principal y otras muchas. En los suburbios cayeron algunas casas, y en varios lugares de la ciudad se abrieron grietas en el suelo; las losas de las banquetas se levantaron, sobre todo al occidente de la ciudad, por Nuevo México, Belén y San Fernando. En la plazuela de Loreto y la Concepción se formaron varias aberturas en la tierra, sobre todo, en la última de las nombradas, eran más numerosas y aunque estaban en varias direcciones, predominaban las de Norte a Sur. Una curiosa observación es el haberse notado que de 175 pozos artesianos, 40 dieron doble cantidad de agua, 10 aumentaron en una tercera parte, 10 cuatuplicaron su rendimiento y uno se cegó. La afluencia de su agua a causa del temblor, parece asegurarnos que los depósitos de agua pluvial que





TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

abastece el lecho hidráulico de que se surten dichos pozos, sufrió alguna notable alteración, la que bien pudo acontecer a causa de un derrumbe subterráneo en la montaña trachítica de Córdoba y Río Frio, por lo cual oyeron los habitantes de Texcoco las conmociones precursoras de la víspera, y que debieron preceder el terremoto todo el tiempo que el agua se mantuvo en estado esferoidal, hasta determinarse la evaporación explosiva.

Como relata García Cubas en sus escritos este sismo, también llamado de Santa Juliana, produjo choques de las aguas de las acequias, obligándolas a dirigirse en direcciones encontradas a causa del repentino desnivel producido por el terrible e irregular movimiento de la tierra. Los movimientos debieron ser simultáneamente contrarios en la capital y así se explica el efecto mecánico producido, que determinó en las bóvedas de unos templos y en las techumbres de no pocos

edificios, anchas y extensas aberturas que se correspondían en una dirección. Se tiene este temblor como el más fuerte que se haya sentido allí, pues el del 7 de abril de 1845, que causó grandes daños no averió, como éste, el edificio de la Inquisición ni a tantos templos.

También se registraron daños en los estados de Oaxaca, Jalisco, Michoacán, Colima y Guerrero. En Chilpancingo cayeron al suelo sesenta casas, quedando las calles cerradas con los escombros. En Morelia, padeció extraordinariamente la Catedral, que es un edificio muy sólido, quedando en completa ruina la Compañía, San Agustín y otro convento. Entre los edificios no hubo uno solo que no sufriera quebrantos y muchos cayeron al suelo. En Pátzcuaro fue el terremoto igualmente terrible; la iglesia parroquial quedó completamente dañada y de algunas ruinas se extrajeron 16 cadáveres. Los pueblos de Indaparapeo, Charo y otros

quedaron arruinados. Idénticos perjuicios recibieron muchas poblaciones del estado de Jalisco y del estado de Colima.

Se tienen registros de los daños producidos en la ciudad de Morelia: "Entre los edificios, no quedó uno sano, y muchos vinieron a tierra con gran estrépito, y con mucha consternación por parte de los habitantes, que jamás habían visto cosa semejante".

Como relata Orozco: "En el departamento de Michoacán el terremoto se sintió en casi todo él, por más de dos minutos; pero en donde se hizo sentir más el fenómeno fue en Pátzcuaro, donde el sacudimiento causó terribles efectos, arruinando varios templos y casas, y causando varias desgracias personales. En los pueblos de Charo, Indaparapeo y otros cayeron muchas casas; sintiéndose igualmente en Ario, Tacámbaro, Uruapan, Apatzingán, Los Reyes y otros muchos lugares" (SUÁREZ, 1996: 305-314).

## Sismos Históricos

### TESIS CON FALLA DE ORIGEN

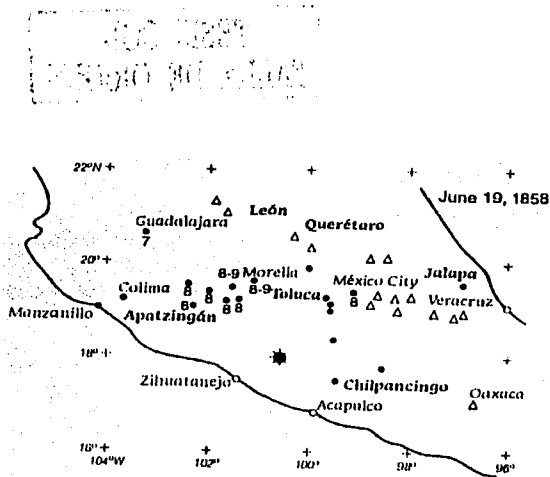


Fig. 29: Intensidad en la escala MM del Sismo del 19 de junio de 1858. Fuente: SINGH, 1996: 1657.

En Guadalajara el movimiento oscilatorio fué tan fuerte que se dificultaba estar de pie. Se reportó una duración de 2 minutos. También se sintió en el estado de Guerrero, aunque no tan violentamente como en otros lugares, así como en algunos lugares en los que rara vez son sentidos: San Juan del Río, Querétaro, León, Lagos, Pachuca y Tulancingo.

En un estudio realizado por el Dr. Shri Krishna Singh y L. E. Pérez-Rocha, publicado en el boletín de la Sociedad Sismológica de América, en diciembre 1996, se menciona lo siguiente acerca del sismo de 1858:

En esa época no había poblados a lo largo de la costa del Pacífico con una población superior a los 5000 habitantes, excepto por Colima, la densidad de población era poco densa. Una consecuencia de esta distribución de la población es la dificultad para asignar la localización del epicentro en base a las intensidades reportadas, por lo que en este estudio se usaron mapas de intensidades de otros eventos ocurridos en el siglo XIX y también en el siglo XX, y se construyeron mapas con los daños e intensidades descritos por Orozco y Berra, en base a la escala de Mercalli Modificada.

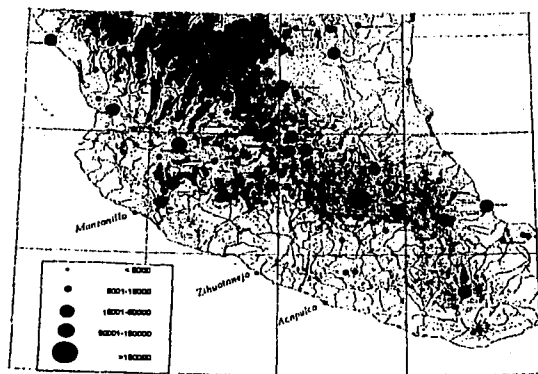


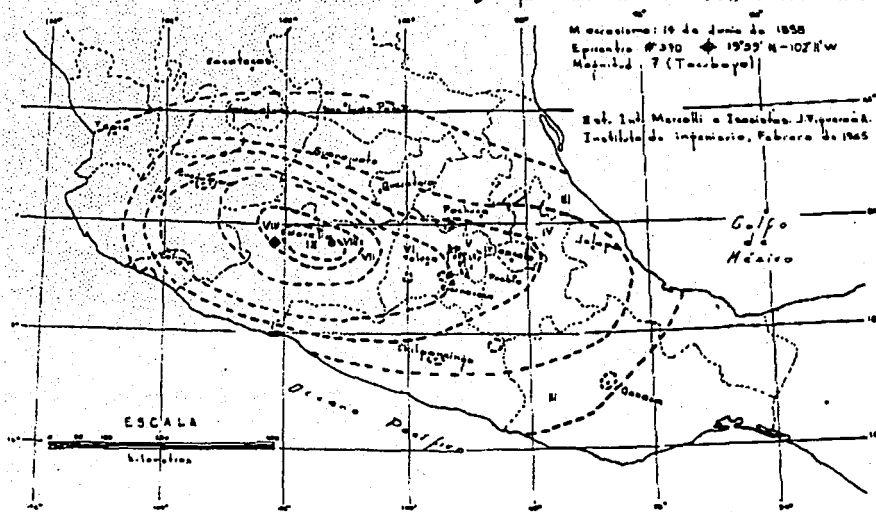
Fig. 30: Distribución de la población en México, 1821-1899. Fuente: SINGH, 1996: 1657.

Se señalan distintas posibilidades de localización del epicentro descartando la localización de dicho evento sobre la



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 31: Mapa de Isosistas propuesto por J. Figueroa A. para el sismo de Santa Juliana con base en el sismo de 1964, M=7. Fuente: FIGUEROA, 1965.



costa, debido a que ocasionaría daños más severos en el Estado de Guerrero y Oaxaca si se hubiese presentado al SE de Acapulco; de la misma forma, al presentarse al NW del epicentro del sismo de 1985 se vería seriamente dañado el Estado de Colima y algunos sitios de Jalisco. También analizaron la posibilidad de que se hubiese desarrollado a lo largo de la costa entre Acapulco y Zihuatanejo, lo cual nos indica menores intensidades alrededor de Uruapan, Pátzcuaro y la Ciudad de México, lo cual no concuerda con los reportes de los daños que se tienen.

Después de haber analizado las distintas posibilidades de localización del

sismo de Santa Juliana, Singh y sus colaboradores propusieron como la más acertada la que se aproxima a los sismos del 6 de Junio de 1964 (M 7.3) y 23 de Mayo de 1984 (M 5.7). No es posible tener una localización definitiva del evento de 1858 pues, como se mencionó anteriormente, el epicentro estuvo situado en un área escasamente poblada y de difícil acceso, pero si es posible concluir que para las intensidades que fueron observadas en y cerca de Morelia, debió tener una magnitud más grande que la del sismo de 1964.

Esta localización parece ser aquella cuyo foco estuvo situado a una profundidad intermedia de 50 km. y

## Sismos Históricos

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOLÓGIA Y MINERÍA

producto de una falla normal en la placa de Cocos; se tiene la posibilidad de que las intensidades variaron entre VIII y IX en el centro de la región, cerca de Morelia.

Singh planteó inicialmente una magnitud para este sismo de 7.5, asumiendo que se localizó cerca del sitio donde se produjo el sismo de 1864 y que tuvo una magnitud de 7.3, sin embargo, tanto la localización como la magnitud del sismo son inciertas. En base a la observación de la atenuación de intensidades MM y utilizando la ecuación:

$$I = aM + b$$

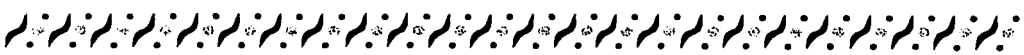
se obtuvo que una magnitud entre 7.7 y 8.2 corresponde a una intensidad de VIII durante el evento de 1858. También con la ecuación:

$$M = \log A + 1.38$$

se obtiene una  $M=7$  debido a una baja estimación del área por la pobre comunicación y la esparcida densidad de población.

Eventos de fallamiento normal de  $M=7.3$ , con hipocentros sobre el altiplano mexicano son relativamente frecuentes y pueden llegar a alcanzar magnitudes de 7.7 (SINGH, 1996: 1655-1666).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## 2.6 Sismo del 19 de Julio de 1882

A las 2:35 p.m. se sintió un fuerte y prolongado temblor que se inició con un movimiento trepidatorio, marcando en la escala del sismógrafo del observatorio 3 mm. Después cambió por otro de oscilación de N a S y en seguida de N-NE a S-SO. Su duración se estimó en un minuto, aunque algunos periódicos la consideraron de dos y hasta de dos minutos y medio; éstas son apreciaciones erróneas que exageraron la duración por lo impresionante de la magnitud del temblor. Este fenómeno produjo en la población gran alarma; algunos edificios principales se resintieron, cayeron paredes y tapias y los acueductos sufrieron numerosos daños (SAN JUAN, 1987: 45).

El sismo causó la caída de aproximadamente treinta bardas y paredes, algunas de 20 m. de longitud, entre ellas la que circundaba el Convento de San Fernando. Se derrumbó el techo de una almidonería y se cayeron puertas, faroles y tinacos. Sufrieron cuarteaduras: la Catedral, el Sagrario, las iglesias de San Fernando y San Agustín, que se hundió en la parte noroeste, la capilla de San Salvador el Verde, algunas casas y los siguientes

edificios públicos: Colegio de Minería, Palacio Nacional, la Diputación, Escuela de Comercio, Archivo General de la Nación, Portal de Agustinos, Cuartel de Zapadores y un portal en San Lázaro. Las cuarteaduras que sufrieron los muros de las construcciones fueron hasta de 2 y 3 metros de espesor. Los acueductos de Belén y de San Cosme sufrieron daños, el canal cercano a San Lázaro se hundió y la laguna de Texcoco se derramó, llevando sus aguas a 2 kilómetros de distancia (SAN JUAN, 1987: 59).

Este temblor parece ser menor que el de 1858; los mayores daños ocurrieron en la frontera norte de los estados de Oaxaca y Guerrero, lo cual nos demuestra que no se trata de un sismo de subducción. Haciendo una comparación de los daños reportados ha sido posible estimar una magnitud probable de 7.5, menor que la del sismo de Santa Juliana en 1858.

El hecho de que se han presentado grandes sismos tensionales nos sugiere que eventos de este tipo representan un peligro potencial para la ciudad de México y otras poblaciones del interior del país.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.7 Sismo del 19 de Septiembre de 1985

Este sismo ocurrido en la Brecha de Michoacán, cuyo epicentro fue localizado por el Servicio Sismológico Nacional a  $17.6^{\circ}$  N y  $102.5^{\circ}$  W en el Océano Pacífico frente a la desembocadura del Río Balsas, se originó a las 07:17:48.5 hora local y su magnitud fue de 8.1 grados en la escala de Hanks y Thatcher ( $M_w$ ), apropiada para eventos muy grandes.

En estudios posteriores se ha establecido que el sismo estuvo formado por dos eventos principales, el segundo de los cuales ocurrió 29 segundos después de iniciado el primero, además de que continuaron las réplicas siendo la más representativa la ocurrida el 20 de septiembre, que no causó grandes daños como el evento principal.

Una característica de este fenómeno fue la generación de un *maremoto* que éste provocó. A los *maremotos* también se les conoce como "Tsunamis" y son la consecuencia de un sismo tectónico bajo el fondo

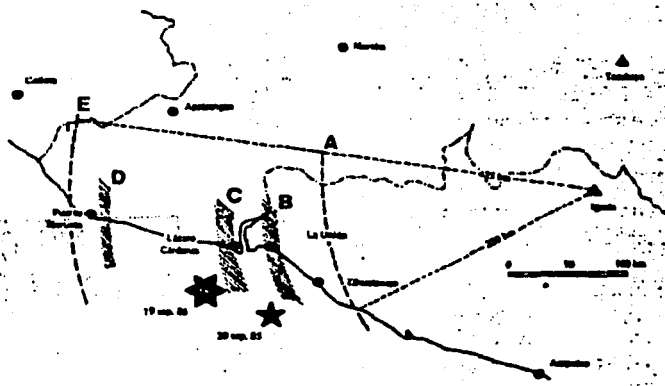


Fig. 32: Delimitación de la zona de réplicas A y E, los segmentos achurados B, C y D muestran las regiones en donde ocurrieron la mayoría de las réplicas. Fuente: HERRERA, 1986: 33.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



del océano. La altura máxima alcanzada por las olas en la ciudad de Lázaro Cárdenas fue de dos metros y algunos centímetros.

El sismo inició en forma leve y fue incrementándose gradualmente hasta convertirse en un movimiento oscilatorio con periodos del orden de 2 segundos y duración de más de 2 minutos. Este movimiento produjo intensidades en el D. F. que variaron entre VI y IX. Otras ciudades afectadas fueron Lázaro Cárdenas, Mich., en donde se registraron intensidades de VIII a IX, al igual que en Playa Azul, Mich.; del mismo modo el temblor fue sentido en el estado de Guerrero y fueron registradas intensidades de VII en Zihuatanejo e Ixtapa, en Acapulco de VI y en Ciudad Guzmán, Jalisco de VIII.

En general se cree que las características de éste sismo corresponde a las que se esperaban para un fenómeno característico de la Brecha de Michoacán, no así en cuanto a los efectos que produjo en el D. F., que por la dirección de la ruptura (SE) causó efectos dirigidos a la ciudad de México, además de que por ser un terreno blando toda ésta zona, se amplifican las ondas.

Las cronologías de los sismos históricos sugieren que hay alrededor de tres a cuatro sismos por siglo capaces de producir aceleraciones similares al temblor de 19 de septiembre de 1985 (SUÁREZ: 1-10).

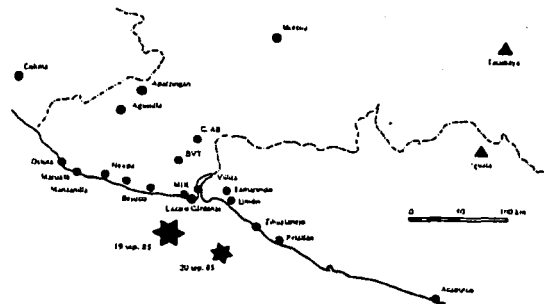


Fig. 33: Localización del epicentro del sismo de 1985 y la réplica mayor. Fuente: HERRERA, 1986:36.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

400 BERTI  
MORNING SUN ALLAN

# Capítulo 3

Estudios  
de Sísmicidad  
para Uruapan

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

RECIBO DE  
PAGO DE

**Estudios de Sismicidad Realizados para Uruapan**

**En éste capítulo nos enfocaremos a detallar los recientes estudios de peligro sísmico que se han realizado en la ciudad y los resultados obtenidos, los cuales nos proporcionan los parámetros que aplicaremos en el análisis de nuestra estructura.**

**Un estudio de peligro sísmico para un sitio determina la probabilidad de que ocurra un temblor de una intensidad dada, como consecuencia de los efectos combinados de temblores moderados y frecuentes que tienen lugar en las cercanías del sitio de interés. Se expresa como la probabilidad, en un periodo de tiempo determinado, de exceder un valor de aceleración máxima del terreno y que se puede interpretar también, como el recíproco del periodo de recurrencia de un temblor.**

**Este tipo de estudios se basan en modelos matemáticos tomando en cuenta la atenuación de las ondas, la fuente de los sismos, todo lo cual está encaminado a la obtención de mapas de peligro y sus respectivos parámetros de diseño sísmico indispensables en la ingeniería civil (PAVÓN: 200-201).**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 3.1 Atenuación de Ondas

La atenuación es la reducción de la aceleración máxima del terreno al incrementarse su distancia respecto del epicentro, es decir, al transmitirse a través del interior y por la superficie de la tierra, y se pueden definir ciertas expresiones que relacionen los parámetros de la fuente con el movimiento de un sitio, a las que se denominan *leyes de atenuación*.

Puede considerarse que la atenuación depende de la disminución de la aceleración con la distancia al origen del sismo, la energía transmitida también se reduce con la distancia por el amortiguamiento que proporciona el suelo a través del cual se propaga, o por la dispersión de las ondas entre los diferentes estratos del suelo (PAVÓN:200-201).

Parámetros como la magnitud (M) y la distancia al foco (R) son indispensables para la creación de las leyes de atenuación, aunque la magnitud

puede variar ya que algunos autores prefieren emplear la magnitud de momento (Mw) y otros la magnitud de ondas superficiales (Ms) que considera la amplitud del trazo producido por las ondas de superficie, aunque comienza a saturarse con magnitudes alrededor de 7.5, a diferencia de la magnitud de momento que es más apropiada para definir el tamaño de eventos muy grandes.

En éste estudio se obtuvieron leyes de atenuación para la ciudad de Uruapan, tanto para sismos de subducción, considerando una distancia epicentral de 150 km que es la distancia promedio de la fuente al sitio, así como para los sismos de fallamiento normal, para los cuales se tomaron en consideración diferentes distancias epicentrales (50, 100 y 200 km) que al ajustarlás dan por resultado la siguiente ley de atenuación para sismos profundos y diferentes distancias al epicentro:

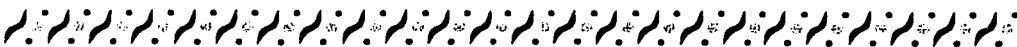
#### *Leyes de Atenuación para sismos de Subducción*

Para R= 150 km:  $\text{Log } a_{\text{MAX}} = 0.3054M_s - 1.3599\text{logR} + 2.2454$

Para R= 300 km:  $\text{Log } a_{\text{MAX}} = 0.444M_s - 2.454\text{logR} + 4.059$

$$a = \frac{1935 e^{0.1M}}{(R+3.22)^2}$$

*Ley de atenuación para sismos tensionales*  
(MARTÍNEZ: 28-32).





## Estudios de Sismicidad

### TESIS CON FALLA DE ORIGEN

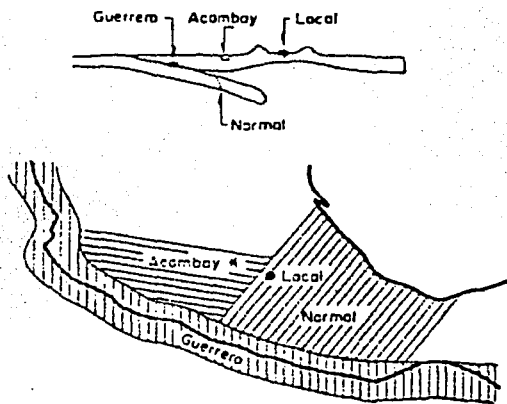


Fig. 36: Ubicación de la falla de Acambay respecto a los demás mecanismos sismogénicos. Fuente: MARTÍNEZ, 2000:37.

Otra fuente generadora de sismos es la falla de Acambay y que consiste en un pliegue producto de la interacción entre la placa de Cocos y de Norteamérica. En la siguiente figura se representan los diferentes mecanismos sismogénicos de la República Mexicana que se consideraron en este estudio. (MARTÍNEZ; 2000: 33-37).

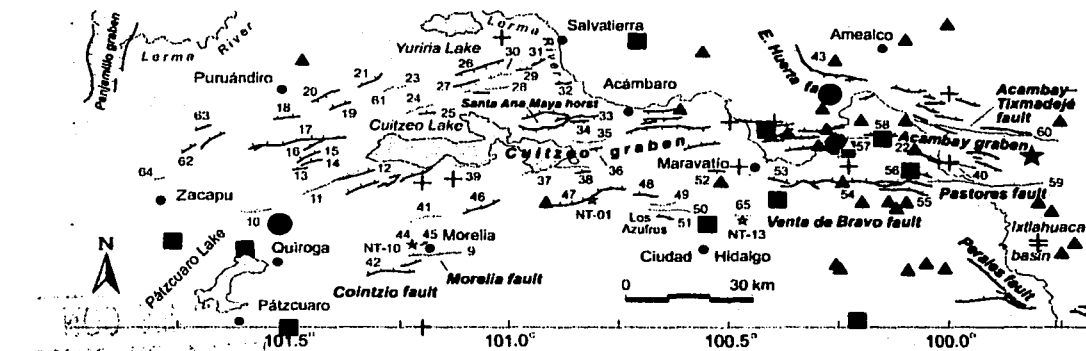


Fig. 37: Localización de la falla de Acambay. Fuente: SUTER, 2001: 694.



### 3.3 Obtención Determinista del Peligro Sísmico

Definido el sitio o fuente de un sismo probable, es posible determinar el más grande temblor que puede producir ésta falla, o lo que es lo mismo, estimar la *magnitud máxima* que puede esperarse en el sitio, ya que con éste parámetro muchas veces se diseñan importantes estructuras. Sin embargo, dada la carencia de registros históricos de los sismos es difícil determinar el potencial sísmico de una fuente o falla geológica.

Esta magnitud máxima se obtiene de fórmulas semiempíricas, propuestas por expertos, en las que intervienen el deslizamiento y la longitud de la falla, el área de ruptura, la tasa de deslizamiento, entre otras.

La *longitud de ruptura* de la falla es función de su geometría, de las propiedades de la roca, de los desplazamientos y de los esfuerzos locales. Por otro lado, el *área de ruptura*

relaciona tanto el ancho como la longitud de la falla, en éste caso se emplea la fórmula propuesta por Wyss en 1979:

$$M = A + 4.15$$

donde *A* es el logaritmo del área de ruptura en km<sup>2</sup> y *M* la magnitud máxima.

La *tasa de deslizamiento de la falla* es el movimiento que sufre ésta en un cierto periodo de tiempo, por lo que se obtiene del cociente de el desplazamiento total entre el tiempo transcurrido.

Rosenblueth y Ordaz obtuvieron la magnitud máxima que se puede generar por sismos de subducción, en base a la división mencionada anteriormente y obtuvieron los siguientes valores, donde *S* representa la tasa de deslizamiento y *L* la longitud máxima de ruptura (ROSENBLUETH Y ORDAZ, CITADO POR MARTÍNEZ; 2000: 40).

Cuadro No 3: Magnitud máxima generada por sismos de subducción

FUENTE	NOMBRE DE LA FUENTE	L	S	E"(M)
1	Tehuantepec	140	7.88	8.203
2	Oaxaca Este	160	7.68	8.310
3	Oaxaca Central I	140	7.37	8.361
4	Oaxaca Central II	90	7.17	8.265
5	Oaxaca Oeste	110	6.93	8.158
6	Ometepepec	70	6.71	8.278
7	San Marcos	140	6.50	8.224
8	Guerrero Central	65	6.27	8.170
9	Petatlán	110	5.98	8.312
10	Michoacán	90	5.79	8.226
11	Colima I	110	5.51	8.120
12	Jalisco	100	5.14	8.358

Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 40

## Estudios de Sismicidad

Para sismos normales se recurrió al modelo de Poisson obteniendo magnitudes para la división indicada con anterioridad: (SEGÚN MARTÍNEZ, 2000)

Cuadro No 4: Magnitud máxima generada por sismos normales o tensionales

FUENTE	$\lambda(M_0)$	$\beta$	$CV(\beta)$	$\sigma(M)$	Mm	$M_0$	$E''(M)$
1	0.351	1.429	0.0256	0.070	6.3	4.0	7.40
2	0.270	1.629	0.028	0.084	5.8	4.0	7.20
3	0.324	1.407	0.026	0.100	5.6	4.0	7.13
4	0.270	1.494	0.028	0.100	5.6	4.0	7.13
5	0.595	1.600	0.021	0.065	6.3	4.0	7.40
6	0.324	1.557	0.026	0.100	5.5	4.0	7.09
7	0.378	1.493	0.025	0.092	5.7	4.0	7.18
8	0.216	1.643	0.029	0.121	5.1	4.0	6.94
9	0.405	1.409	0.024	0.050	6.9	4.0	7.66
10	0.459	1.498	0.023	0.085	5.8	4.0	7.20
11	0.243	1.643	0.029	0.094	5.6	4.0	7.13
12	0.297	1.659	0.027	0.096	5.5	4.0	7.09

Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 41

En la tabla  $\lambda(M_0)$  es la tasa de excedencia para la magnitud umbral  $M_0$  (magnitud mínima que se ha presentado en el sitio) que se obtiene de graficar el logaritmo del número de eventos  $N(\lambda(M_0))$  contra su magnitud,  $\beta$  es la pendiente de la tasa de excedencia de la magnitud,  $CV(\beta)$  es el coeficiente de variación de  $\beta$ ,  $\sigma(M)$  la desviación estándar de la magnitud máxima, Mm la magnitud máxima observada en la fuente y  $E''(M)$  el valor esperado de la magnitud máxima.

En base a estos valores de magnitud estimados es posible obtener las aceleraciones máximas tanto para sismos de subducción como para sismos normales, considerando a su vez las distancias (R) del centro de la falla al sitio en estudio.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para el caso de sismos de subducción se emplea la ley de atenuación propuesta por Sánchez y Jara (1997) para  $R=150$  km, obteniendo las siguientes aceleraciones:

Cuadro No 5: Aceleraciones máximas para sismos de subducción

FUENTE	NOMBRE	DISTANCIA R (Km)	E" (M)	ACELERACIÓN MÁX. (cm/seg <sup>2</sup> )
1	Tehuantepec	912.755	8.203	5.307
2	Oaxaca Este	809.937	8.361	6.977
3	Oaxaca Central I	721.341	8.265	7.634
4	Oaxaca Central II	635.846	8.265	9.063
5	Oaxaca Oeste	581.627	8.278	10.324
6	Ometepec	484.718	8.158	12.158
7	San Marcos	421.200	8.278	16.013
8	Guerrero Central	315.048	8.224	22.881
9	Petatlán	245.468	8.17	30.929
10	Michoacán	172.861	8.312	55.061
11	Colima I	157.741	8.226	58.700
12	Jalisco	317.808	8.358	24.845

Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 42

Al igual que en los sismos de subducción, en los temblores de fallamiento normal se puede obtener la respuesta máxima por medio de la propuesta hecha por Rosenblueth y Ordaz, en la que la distancia focal  $R$  se calcula mediante la siguiente expresión de trigonometría esférica:

$$R = \frac{2\pi r a}{360}$$

donde  $r$  es el radio ecuatorial (6,378,203.4 m) y  $a$  se calcula mediante la expresión:

$$a = \text{arc cos} [\cos(90-\mu_1)\cos(90-\mu_2) + \text{sen}(90-\mu_1)\text{sen}(90-\mu_2)\cos(\lambda_1-\lambda_2)]$$

en la cual  $\mu_1, \mu_2$  son las coordenadas de latitud para el epicentro y el sitio respectivamente, mientras que  $\lambda_1, \lambda_2$  son las coordenadas de longitud.

## Estudios de Sismicidad

Cuadro No 6: Aceleraciones máximas para sismos de fallamiento normal

FUENTE	DISTANCIA (KM)	E"(M)	ACELERACIÓN MÁX (cm/seg <sup>2</sup> )
1	149.053	7.40	31.078
2	50.794	7.20	210.477
3	112.539	7.13	43.330
4	82.607	7.13	78.822
5	133.075	7.40	38.792
6	161.978	7.09	20.606
7	221.721	7.18	11.943
8	159.340	6.94	18.874
9	217.969	7.66	18.135
10	273.465	7.20	8.021
11	286.588	7.13	6.913
12	329.106	7.09	5.092

Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 43

Latitud del epicentro:

19° 39'

Longitud del epicentro:

101° 30'

y considerando el sitio en la ciudad de Uruapan, se tienen las siguientes coordenadas del centro de la ciudad (Casa de la Cultura):

Latitud del sitio: 19.42°

Longitud del sitio:

102.06°

Un caso particular es la estimación de la aceleración máxima del suelo de la ciudad de Uruapan producido por el sismo de Santa Juliana del 19 de junio de 1858, considerando la localización del epicentro en la ciudad de Pátzcuaro, en base al mapa de isosistas propuesto por Figueroa (1965):

con una magnitud máxima esperada de 7.3, como lo señala Singh en su estudio y aplicando todos los datos en la ley de atenuación de sismos tensionales resulta una aceleración máxima de:  
 $a_{máx} = 146.863 \text{ cm/seg}^2$



## 3.4 Obtención Probabilística del Peligro Sísmico

La ocurrencia de los sismos es muy difícil poder estimarla con exactitud, aunada a la falta de información histórica sobre éstos fenómenos, ya que los aparatos para registrar los movimientos de la corteza son relativamente nuevos y su desarrollo apenas comienza.

Como se mencionó anteriormente una de las herramientas auxiliares para determinar el riesgo sísmico son modelos matemáticos basados en probabilidades de ocurrencia, y el cual se expresa como la probabilidad anual o en un periodo predeterminado de tiempo en el que se puede exceder un valor de aceleración máxima del terreno, éste tipo de ecuaciones son conocidas como *Tasa de Excedencia de Aceleración*.

Se tienen registros de sismos de subducción que han ocurrido alrededor de tres a cuatro eventos de ésta naturaleza cada siglo, por lo que su ocurrencia ha sido relativamente periódica y sus magnitudes tienen cierta tendencia o preferencia, dando lugar a los *temblores característicos*. Para estos fenómenos en éste estudio se hace uso de una distribución lognormal, haciendo caso de las conclusiones de Jara y Rosenblueth, con lo que se obtuvieron los siguientes tiempos de ocurrencia de temblores de subducción:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Estudios de Sismicidad

**Cuadro No 7: Tiempo transcurrido desde el último temblor característico**

REGIÓN	LOCALIZACIÓN (grados)	to(años)
Tehuantepec	94.00-95.20	38
Oaxaca Este	95.2-96.40	36
Oaxaca Central I	96.40-97.30	23
Oaxaca Central II	97.30-97.70	73
Oaxaca Oeste	97.70-98.20	33
Ometepec	98.20-99.30	19
San Marcos	99.30-100.00	44
Guerrero Central	100.00-101.00	90
Petatlán	101.00-105.80	22
Michoacán	101.80-103.00	16
Colima I	103.00-103.70	28
Jalisco	104.30-105.70	69

Fuente: MARTÍNEZ, 2000: 46

Para el caso de la sismicidad profunda y la de Acambay los tiempos entre eventos se encuentran distribuidos exponencialmente, y se ha demostrado que su distribución no se altera al aumentar el tiempo transcurrido sin temblar, a lo cual se conoce como "falta de memoria".

La probabilidad de excedencia de una cierta aceleración se puede representar por medio de gráficas que relacionan la probabilidad de que esa aceleración sea excedida en función del tiempo. Esta probabilidad total anual se puede representar como la suma de las probabilidades, de todos aquellos temblores que pudieran afectar al sitio en cuestión y matemáticamente se expresa como:

$$P(Sa > a^*) = \int_a \int_m \int_t pSaM, Ro(a^*) pM(M) pR(Ro) pT(t) da dm dt$$

al aplicar esta expresión, Martínez (2000) obtuvo la siguiente tasa de excedencia de aceleración para la ciudad de Uruapan en terreno firme, y para un periodo de retorno de 100 años, la cual se representa mediante la gráfica.

En base a la gráfica anterior, podemos deducir que la probabilidad de que se exceda la aceleración máxima calculada antes para el sismo de Santa Juliana que nos resultó de aproximadamente  $146.863 \text{ cm/seg}^2$ , se obtiene una probabilidad de excedencia de alrededor de 0.007 lo cual nos indica que la probabilidad de que un sismo de tales magnitudes se presente nuevamente es de 143 años a partir del último evento (MARTÍNEZ, 2000: 44-57).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

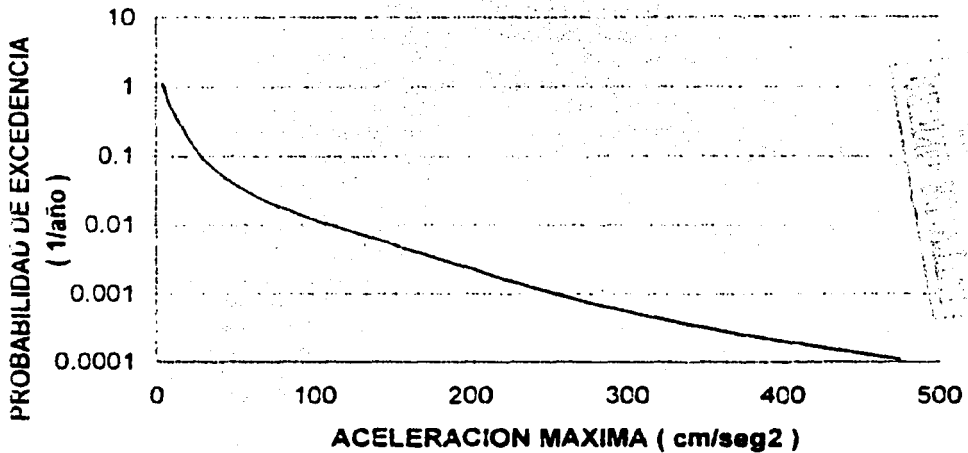


Fig. 38: Tasa de excedencia de aceleración para terreno firme, con un periodo de retorno de 100 años. Fuente: MARTÍNEZ, 2000:57.

## 3.5 Espectros de Diseño Sísmico para la Ciudad de Uruapan

En este estudio se obtuvieron espectros de diseño para tres zonas representativas de la ciudad, ya que existen variantes en las características de los suelos entre las diversas porciones que se pueden distinguir en ésta, como zonas de limos plásticos, otras de materiales arcillo-arenosos y una muy peculiar por el límite marcado por el Río Cupatitzio, en donde se distingue "malpais o roca empacada en limos o arcillas" hacia el poniente del río. Por esta razón se decidió tomar como lugares de estudio el edificio de Telmex en el centro de la ciudad, la papelera (INPAMEX) y Soriana, debido a que en estos sitios se realizaron sondeos profundos, los cuales nos permiten conocer las propiedades dinámicas de los suelos de forma indirecta.

El primer paso para la determinación de éstos espectros consistió en determinar los espectros de Fourier en base a la magnitud (M) y a la distancia a la zona de ruptura (R) tanto para los sismos de subducción,

normales y los debidos a la falla de Acambay, que se pueden apreciar detalladamente en la referencia antes mencionada, los cuales representan las amplitudes y frecuencias de los sismos en diferentes tipos de suelos.

Posteriormente se determinaron las propiedades dinámicas de los estratos de los suelos en estudio, tal es el caso de la velocidad de las ondas de cortante, para así estimar las *funciones de transferencia*  $F(\omega)$  que son una función matemática resultante del cociente entre los espectros de amplitudes de Fourier obtenidos en suelo blando (o de transición) y en terreno firme (o semiespacio) respectivamente, que nos permiten obtener el espectro de Fourier en la superficie libre del estrato para los tres sondeos analizados, obtenidos por el producto del espectro de Fourier en el semiespacio por su correspondiente función de transferencia, es decir:

$$Y(\omega) = A(\omega)F(\omega)$$



Finalmente, para calcular el espectro de respuesta o de diseño se considera un cierto factor de amortiguamiento crítico ( $\xi$ ), ya que el espectro obtenido anteriormente es una medida de la intensidad del temblor, y al involucrar ese amortiguamiento se está expresando la intensidad relacionada con el posible daño a estructuras (MARTÍNEZ; 2000: 58-75).

El concepto de espectro se puede representar como la respuesta máxima de un oscilador, como se esquematiza a continuación:

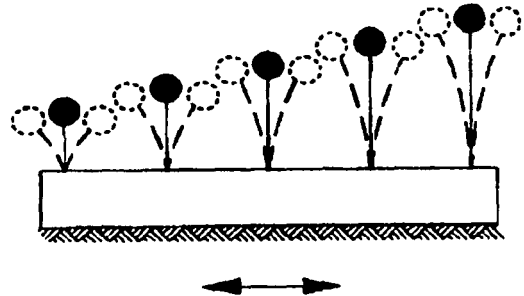


Fig. 39: Osciladores, cada uno con un período natural diferente al vibrar para ilustrar la forma en que se obtiene el espectro de respuesta. Fuente: PAVÓN, 1998: 192.

Del cual se puede apreciar que

cada oscilador vibrará con una amplitud diferente a causa de que cada uno tiene sus propias características dinámicas, que para este caso se tiene un periodo diferente de cada oscilador al vibrar, los cuales van aumentando de valor de izquierda a derecha.

El espectro de respuesta es una herramienta muy valiosa para determinar el efecto de un sismo en las estructuras (PAVON; 1998:192)

Aplicando la teoría de vibraciones aleatorias es posible determinar la aceleración máxima del terreno mediante la expresión:

$$a_{m\acute{x}} = a_{m\acute{s}} \{ [2 \ln(N)]^{1/2} + \gamma [2 \ln(N)]^{1/2} \}$$

donde:  $N=2fT$  siendo  $f$  la frecuencia dominante del movimiento y  $T_d$  la duración de la ruptura, calculadas como:

$$f = \frac{1}{2\pi} [m_2 / m_0]^{1/2}$$

$$T_d = 1/f_c$$

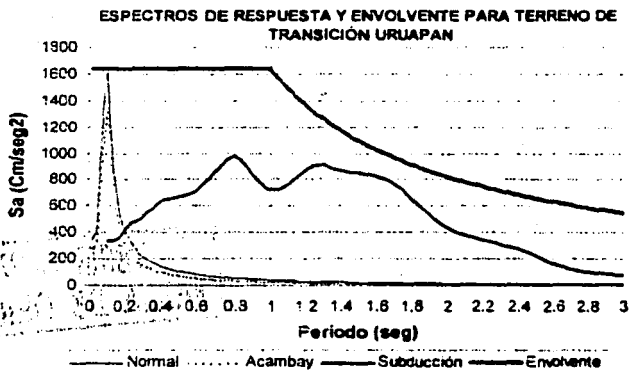
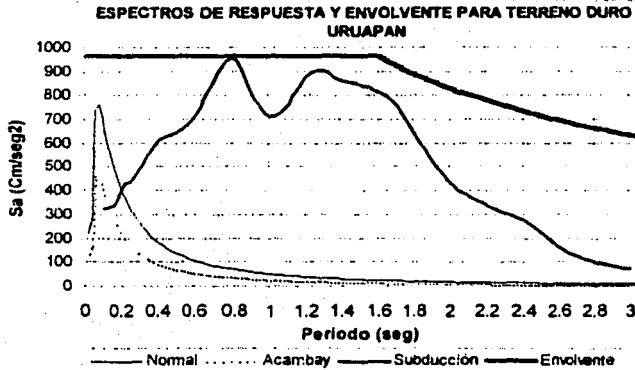
$a_{m\acute{s}}$  = aceleración cuadrática media =  $[m_0 / T_d]^2$   
 $\gamma$  = constante de Euler = 0.5772

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

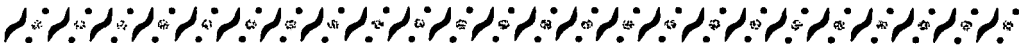
# Estudios de Sismicidad

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Fig. 40 y 41: Espectros obtenidos del estudio de peligro sísmico de Uruapan. Fuente: MARTÍNEZ, 2000:80.

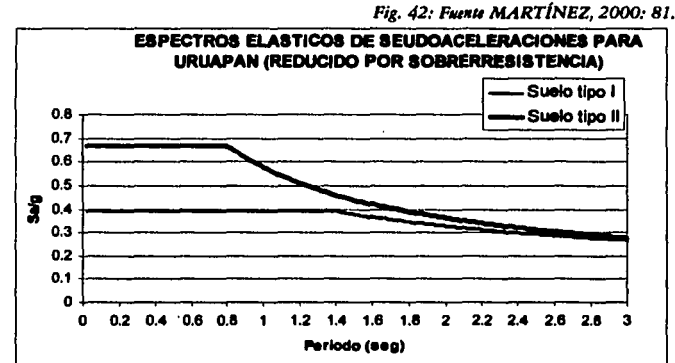


Aplicando la expresión anterior se obtienen los espectros de respuesta para los diferentes tipos de terreno de la ciudad, de lo cual se dedujo que sólo hay dos tipos de terreno en Uruapan: firme y de transición. En base a esos espectros se generaron los espectros de diseño sísmico, haciendo una envoltente con los diferentes tipos de movimientos esperados como se muestra a continuación:



Se proponen los espectros de diseño sin hacer reducciones por ductilidad, los cuales nos expresan en forma gráfica la envolvente de todos los posibles eventos sísmicos que pueden presentarse durante un cierto intervalo de tiempo, contra el periodo de vibración de un sistema de un grado de libertad situado en dicho lugar.

Puede concluirse que para sismos de subducción la amplitud máxima se presenta para un periodo (T) de 0.8 seg. correspondiéndole un valor de 0.98g, con lo que aquellas construcciones de entre 8 y 9 niveles pueden verse afectadas por movimientos de éste tipo. En cambio, para los sismos normales o profundos se tienen las mayores amplificaciones para periodos (T) de 0.1 seg. con lo que las construcciones de 1 ó 2



niveles tienden a sufrir daños con sismos de ésta naturaleza.

Debido a lo cual, los espectros de diseño se trazaron con una meseta amplia desde  $T=0$ , con la finalidad de cubrir tanto periodos cortos como largos.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

WOOD BROTHERS  
SHOULD NO ALLIANCE

# Capítulo 4

## Propiedades de la Mampostería

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FALLA DE ORIGEN  
REGISTRO

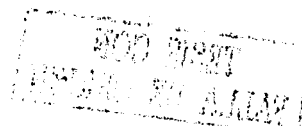
## Propiedades de la Mampostería

La historia de la humanidad ha sufrido la necesidad de tener un lugar en donde protegerse de las inclemencias de la naturaleza, para lo cual ha buscado materiales fáciles de utilizar y de adquirir. Se cree que el origen de la mampostería pudo haber sido al formar, el hombre, un refugio natural que lo protegiera de las adversidades de la naturaleza apilando piedras. Su posterior desarrollo debe ser el uso del mortero de barro que permitió un mejor acomodo de las piezas irregulares.

México cuenta con una larga y destacada trayectoria en el empleo de la mampostería dentro del campo de la construcción, y muestra de ello son las magníficas obras de las culturas prehispánicas, desde las pirámides hasta los muros de contención, que aún permanecen y dan testimonio de su belleza y calidad constructiva.

Generalmente se considera a la mampostería como un material estructural de secundaria importancia, comparándolo con el acero o el concreto, por lo que se supone, erróneamente, poco apto para ser objeto de estudios y cálculos ingenieriles.

México ha estado adelante en la normativa sobre el diseño estructural de este material, tal es el caso del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. El diseño y construcción de la mampostería ha sido exitosa en nuestro país, ya que las edificaciones de este tipo han sufrido relativamente pocos daños ante sismos severos que se han presentado. (Fundación ICA, 1999: 3-7)



## Propiedades de la Mampostería

### 4.1 Propiedades de los Materiales Componentes

En este inciso se presentan las principales características de los materiales que con mayor frecuencia se utilizan para la construcción de mampostería para vivienda. Las propiedades mecánicas de la mampostería son muy variables debido al poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales componentes y los procedimientos de construcción empleados.

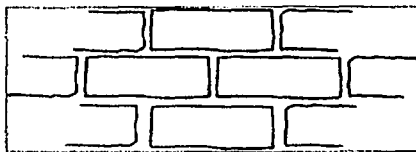
#### a) UNIDADES O PIEZAS:

El componente principal de la mampostería es la unidad o pieza, que por su origen puede ser natural o artificial. Las unidades de piedra natural pueden ser labradas o sin labrar. Las piezas artificiales difieren por la materia prima utilizada, sus características geométricas y los procedimientos de fabricación; las materias primas más comunes son el barro, el concreto y la arena con cal.

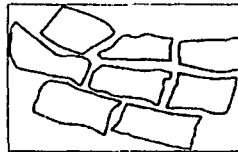
La mampostería de piedra natural labrada se clasifica en los siguientes tipos, de acuerdo con la forma en que ha sido labrada la piedra:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

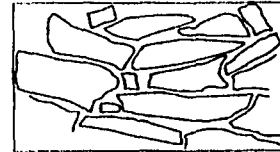
Fig. 43: Tipos de mampostería de piedras naturales. Fuente: Fundación ICA, 1999:20.



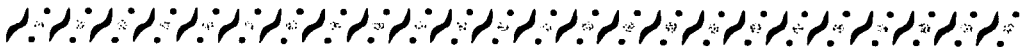
Mampostería de primera



Mampostería de segunda



Mampostería de tercera





## Propiedades de la Mampostería

### MAMPOSTERÍA DE PRIMERA:

En este tipo de mampostería la piedra se labra en paralelepípedos regulares con su cara expuesta de forma rectangular.

### MAMPOSTERÍA DE TERCERA:

La piedra es utilizada con su forma irregular, aunque procurando que la cara expuesta sea lo más plana posible.

### MAMPOSTERÍA DE SEGUNDA:

La piedra es labrada en forma variable, siguiendo la configuración natural con que llega del sitio o banco.

La piedras utilizadas tienen muy variadas propiedades. En la siguiente tabla se muestran las características aproximadas de las piedras más comúnmente usadas en la construcción:  
(Fundación ICA, 1999: 19-20)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuadro No 8: Características de las piedras más comunes

PIEDRA	PESO VOLUMÉTRICO SECO (T/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA A TENSION EN FLEXIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm <sup>2</sup> )
ARENISCAS	1.75 - 2.65	150 - 3200	60 - 120	40 000 - 200 000
BASALTOS (PIEDRA BRAZA)	2.30 - 3.00	800 - 5 800	200 - 300	100 000 - 300 000
GRANITO NATURAL	2.40 - 3.20	800 - 3 000	100 - 200	400 000 - 500 000
MÁRMOL	2.40 - 2.85	300 - 3 000	35 - 200	900 000

Fuente: Fundación ICA, 1999: 20.

## Propiedades de la Mampostería

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Según las NTC-96, las piedras que se empleen en elementos estructurales deben satisfacer ciertos requisitos como:

Resistencia mínima a compresión en dirección normal a los planos de formación: 150 kg/cm<sup>2</sup>. Esta resistencia varía desde 100 kg/cm<sup>2</sup> (areniscas suaves) hasta más de 2000 kg/cm<sup>2</sup> (granitos y basaltos).

Resistencia mínima a compresión en dirección paralela a los planos de formación: 100 kg/cm<sup>2</sup>.

Absorción máxima: 4%

Resistencia al intemperismo: 10%

(Departamento del Distrito Federal, 1996: 14)

### b) MORTERO:

El mortero es una mezcla plástica aglomerante que surge de combinar arena y agua con una material cementante, como cemento, cal, o una mezcla de ambos.

Sus propiedades más importantes son su resistencia a la compresión y tensión, adherencia con la piedra, su módulo de elasticidad, manejabilidad, fraguado e impermeabilidad. El índice de resistencia a compresión se obtiene de la NMX C61, mediante el ensaye de muestras cúbicas de 5 cm. de lado.

Las propiedades mecánicas de los morteros son muy variadas y dependen del tipo de cementante utilizado, así como de la relación arena-cementante. Se considera que los morteros a base de cal son de baja resistencia a compresión, de 1 - 10 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se recomienda evitar el uso de la cal como único cementante del mortero, en aquellos elementos que tengan función estructural.

Los morteros a base de cemento tienen resistencias a la compresión más altas, que los que son hechos a base de cal, entre 40 y 200 kg/cm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad de los morteros varía entre 10 000 y 50 000 kg/cm<sup>2</sup> y el peso volumétrico es aproximadamente de 2.1 ton/m<sup>3</sup>. A diferencia de los morteros de cal, los morteros a base de cemento son de fraguado rápido, menos trabajables y su retención de agua es menor.

Los morteros que resultan de combinar más de un material cementante se conocen como mixtos y en la práctica predominan aquellos elaborados con cemento y cal, combinando las ventajas de ambos materiales.

Para fines estructurales se recomienda una relación arena a cementante de entre 2.25 y 3.0, obteniendo mezclas de buena resistencia, adherencia y baja contracción. El coeficiente de variación en la resistencia de los morteros es de un 20 a 30 %, debido a que la dosificación se realiza por volumen y sin tener un control de la cantidad de agua. (Fundación ICA, 1999: 25-26)

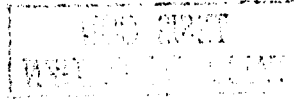
Así mismo, las NTC-96 señalan algunos requisitos que se deben considerar en la mampostería de piedras naturales, como:

Relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes: entre 2.25 y 5.0

Resistencia mínima en compresión: 15 kg/cm<sup>2</sup>. (Departamento del Distrito Federal, 1996: 14)



## Propiedades de la Mampostería



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En la siguiente tabla se muestran algunos proporcionamientos recomendados para elementos estructurales y las resistencias mínimas que deben obtenerse.

Cuadro No 9: Proporcionamientos de mortero

TIPO DE MORTERO	PARTES DE CEMENTO	PARTES DE CEMENTO DE ALBAÑILERÍA	PARTES DE CAL	PARTES DE ARENA	VALOR DE LA RESISTENCIA NOMINAL EN COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )
I	1	0	0 a 0.25	No menos de 2.25	125
	1	0 a 0.5	0	ni más de 3	
II	1	0	0.25 a 0.5	veces la suma de cementantes	75
	1	0.5 a 1	0		
III	1	0	0.5 a 1.25	en volumen	40

Fuente: Fundación ICA, 1999: 26.

Varias investigaciones han demostrado que la adherencia entre el mortero y las piezas de mampostería es de naturaleza mecánica, es decir, cuando se ponen en contacto el mortero con la mampostería, ésta succiona lechada que penetra capilarmente a la pieza que al cristalizar forma la trabazón mecánica, base de la adhesión entre ambos elementos.

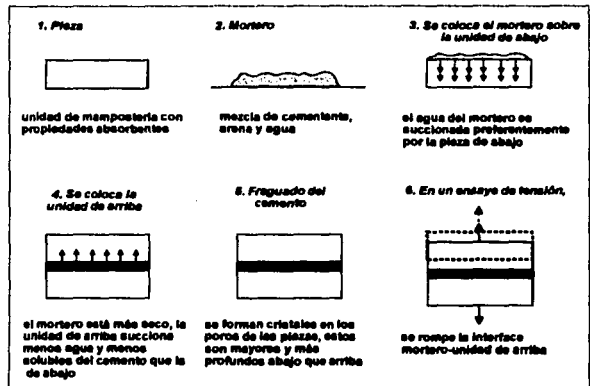


Fig. 44: Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero.

Fuente: Fundación ICA, 1999: 27.

## Propiedades de la Mampostería

### TESIS CON FALLA DE ORIGEN

WCO EIRBY  
MURDERER THE ARIAN

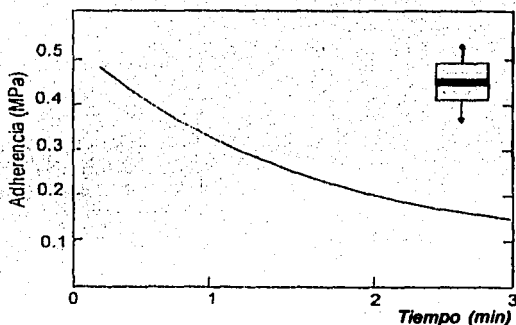


Fig. 45: Variación de la adherencia respecto de la demora de asentado de la pieza superior. Fuente: Fundación ICA, 1999: 28.

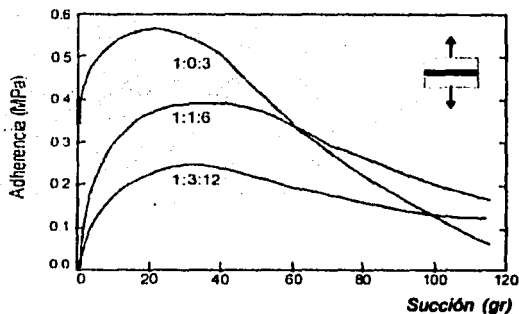


Fig. 46: Efecto de la succión de las piezas en la adherencia para diferentes proporciones de mortero. Fuente: Fundación ICA, 1999: 28.

Como puede observarse en la gráfica, en la pieza inferior se desarrolla una mayor adherencia con respecto a la pieza superior que succiona menos lechada. Para minimizar este efecto se deben proveer juntas de mortero gruesas, humedecer la pieza y aumentar la consistencia del mortero.

En las siguientes figuras se muestra el efecto de diferentes parámetros en la adherencia, la cual puede ser medida mediante ensayos a tensión. En ellas se observa que existe un rango de succión de la pieza, entre los 10 y 40 gramos, al momento de colocar el mortero y, por lo tanto, la adherencia es máxima.

Es evidente que los proporcionamientos elevados de cal y arena reducen la adherencia, al reducirse la concentración de cementante. Además, la demora en la colocación de las piezas permite que el agua se evapore, disminuyendo esa propiedad, al igual que al mover una pieza asentada. En cambio, si se ejerce presión en la colocación de la pieza se mejora la adherencia. (Fundación ICA, 1999: 25-28)

## 4.2 Propiedades del Conjunto Piedra-Mortero

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Estas propiedades pueden deducirse del estudio de los materiales componentes, piedra y mortero, o por medio del ensayo de probetas compuestas, siendo la primera forma menos precisa por la dificultad de tomar en cuenta la interacción de los dos materiales.

Para el caso de la resistencia en compresión de la mampostería de piedras naturales se han obtenido, en especímenes cúbicos de 40 cm. de lado, resistencias del orden de 200 kg/cm<sup>2</sup> para la mampostería de primera y de 120 kg/cm<sup>2</sup> para mampostería ordinaria.

El mecanismo de falla del conjunto piedra-mortero no está muy bien definido, su resistencia suele ser sensible a la calidad del mortero y a la relación entre el tamaño de las piedras y el espesor de las juntas. Se consideran despreciables los efectos de esbeltez si la relación altura a espesor del elemento no excede de 5.

En la siguiente tabla se dan los valores de la resistencia a compresión de la mampostería de piedras naturales, clasificada como de tercera: (Fundación ICA, 1999: 3-7, 31-32)

Cuadro No 10: Resistencia a compresión de la mampostería de piedras naturales

TIPO DE MORTERO	$f_m$	$V^*$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Mampostería juntada con mortero de resistencia en compresión no menor que 50 kg/cm <sup>2</sup>	20	0.6
Mampostería juntada con mortero de resistencia en compresión menor que 50 kg/cm <sup>2</sup>	15	0.4

Fuente: Fundación ICA, 1999: 32.

NOU LIBRE  
MENCIO NO ALIAT

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Capítulo 5

Propiedades  
del Adobe

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1950  
MAY 10 1950  
U.S. AIR FORCE  
OFFICE OF THE  
SECRETARY OF THE AIR FORCE  
WASHINGTON, D.C.



## 5.1 Propiedades Mecánicas del Adobe

Frecuentemente las construcciones de adobe sufren colapsos debido a los sismos, lo cual se puede atribuir no solo a las pobres propiedades mecánicas del material y a su deterioro por intemperismo, también por los defectos de estructuración por los que se caracterizan éstas construcciones, como alturas considerables, muros muy largos sin refuerzo y desligados entre sí y del techo. En éste capítulo se describen las propiedades de este material constructivo, que posteriormente se emplearán en nuestro análisis.

El adobe se realiza con suelo natural del lugar de la construcción, agregando paja y en algunos casos arena, por lo que en general tanto las piezas como el mortero tienen las mismas propiedades. Se puede considerar al adobe como un material homogéneo e isótropo.

De experimentos realizados por investigadores se han determinado las siguientes propiedades típicas:

Cuadro No 11: Propiedades del adobe

Peso volumétrico:	$\gamma = 1\ 800\ \text{kg/m}^3$
Módulo de elasticidad:	$E = 2\ 500\ \text{kg/cm}^2$
Resistencia a compresión:	$13.4\ \text{kg/cm}^2$
Resistencia a cortante:	$1.2\ \text{kg/cm}^2$
Resistencia a tensión por flexión:	$2.6\ \text{kg/cm}^2$
Coefficiente de Poisson:	$\nu = 0.3$

Estos valores fueron determinados en especímenes secos no intemperizados, y cabe recalcar que la humedad provoca una reducción apreciable en la resistencia y rigidez del material.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALI  
DE LA BIBLIOTECA

## Propiedades del Adobe

# 5.2 Propiedades Geométricas de las Estructuras de Adobe

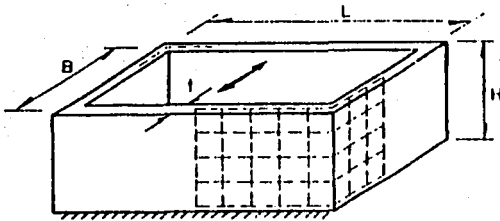


Fig. 47: Idealización de casas de adobe para análisis dinámico. Fuente: MELI, 1994: 53.

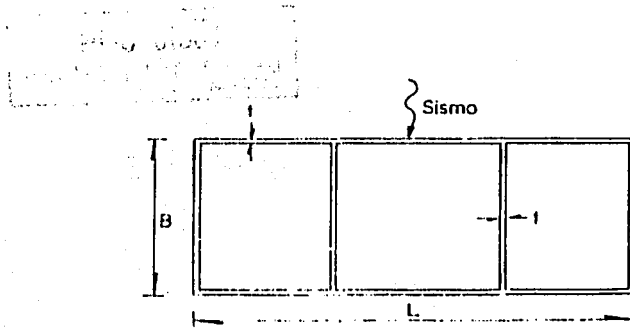


Fig. 48: Planta típica de una casa de adobe. Fuente: MELI, 1994: 59.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La construcción típica de viviendas de adobe consisten básicamente de un cuerpo de un solo piso y planta rectangular alargada de 30 a 50 m<sup>2</sup> de área, con muros de 3 a 3.5 m de altura y 40 a 60 cm. de espesor.

El techo generalmente es a dos aguas, formado con tejas de barro que descansan sobre vigas de madera, con un peso aproximado de 50 kg/m<sup>2</sup>. En regiones de clima extremo son frecuentes los rellenos de tierra de 30 a 50 cm. de espesor sobre tarimas de madera, cuyo peso oscila en los 500 kg/m<sup>2</sup>. Todos los sistemas de techo usuales son flexibles en su plano y no forman un diafragma que rigidice la parte superior de los muros.

En ocasiones existen muros divisorios y en algunas regiones se usan plantas no rectangulares.

## 5.3 Idealización Estructural para el Análisis Sísmico

Debe considerarse que la rigidez de estas estructuras están distribuidas uniformemente en las tres dimensiones y no deben representarse como elementos marco con masas concentradas en los entrepisos, como es lo usual en edificios, sino que debe recurrirse al método de los elementos finitos.

Uno de los efectos de la acción sísmica en casas de adobe es el agrietamiento diagonal de los muros debido a esfuerzos cortantes generados por el movimiento. Los resultados de los experimentos realizados muestran que las zonas más débiles de las casas de adobe con plantas rectangulares son las esquinas, las cuales pueden eliminarse mediante plantas de forma redondeada, permitiendo que una mayor parte de los muros resista por cortante la acción del sismo, lo cual refleja una mayor resistencia y rigidez de la estructura.

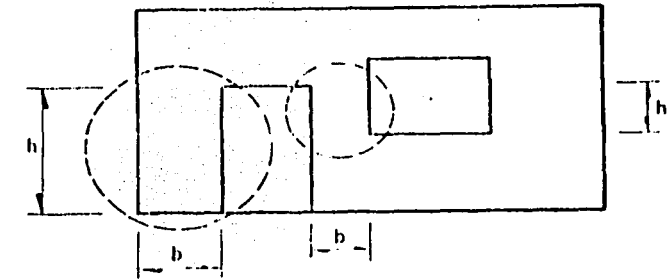


Fig. 49: Zonas críticas por flexión en el plano del muro. Fuente: MELI, 1994: 59.

Para el caso de plantas rectangulares, las grietas en las esquinas hacen que los muros frontales se separen y queden expuestos a voltearse con facilidad, no así en las plantas no rectangulares, que aunque se lleguen a presentar grietas verticales, las partes de los muros separadas proporcionarían rigidez y resistencia al volteo, pues los muros frontales pasan de comportarse como losas a trabajar como arcos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Propiedades del Adobe

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

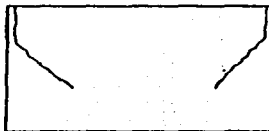
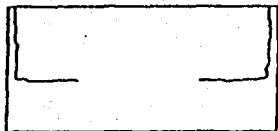


Fig. 50: Posibles mecanismos de agrietamiento del muro. Fuente: MELI, 1994: 56.

La presencia de grietas por flexión en las esquinas no implica el colapso de la estructura, el cual generalmente ocurre después que la grieta se prolonga hacia abajo, o en forma diagonal dentro de los muros frontales hasta que una porción importante de ellos pierde apoyo en sus zonas laterales y se voltea.

Se puede hacer el análisis sísmico de las estructuras de adobe con un método simplificado, mediante el cual se obtienen en forma aproximada las fuerzas sísmicas de diseño para una estructura de adobe de un nivel y planta rectangular. La intensidad del sismo de diseño se expresa en términos de la ordenada correspondiente al primer modo de vibrar. En espectros como los de los reglamentos mexicanos, si no se tiene una estimación confiable del periodo fundamental (T), conviene usar como valor del coeficiente sísmico el correspondiente a la zona plana del espectro.

### COEFICIENTES SÍSMICOS RECOMENDADOS PARA EL ANÁLISIS DE CASAS DE ADOBE EN LA REPÚBLICA MEXICANA (NO SE INCLUYEN REDUCCIONES POR DUCTILIDAD)

ZONA	A	B	C	D
COEFICIENTE SÍSMICO	0.08	0.16	0.24	0.48

Cuadro No 12.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Para obtener la fuerza cortante a que se verá sometida la estructura, se aplica la expresión usada en los métodos estáticos:

$$V = C W'$$

con la variante de que el peso  $W'$  no será el total de la estructura, sino la masa equivalente que se muestra en la siguiente figura:

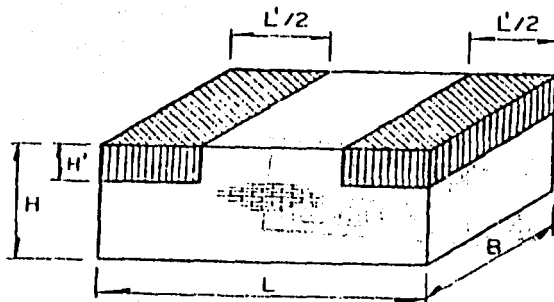


Fig. 51: Masa equivalente para calcular el cortante con el método simplificado. Fuente: MELI, 1994:56.

Si no hay muro intermedio, cada muro transversal debe resistir 50% de  $V$ ; en caso contrario, se debe obtener  $V$  para cada cuarto independientemente y, de este atribuir al muro común el 60% y el 40% restante al muro exterior respectivo. En habitaciones completamente interiores a cada muro correspondería también 50%.

El mismo procedimiento puede aplicarse para determinar la fuerza cortante en los muros longitudinales, la cual puede llegar a ser crítica por la presencia de huecos de puertas y ventanas que reduzcan su área efectiva para resistir cortantes.

donde  $L'$  y  $H'$  se obtienen con:

$L' = 2H^2/L < L$	$H' = H/4$	en casos sin viga-cadena
$L' = 3H^2/L < L$	$H' = H/3$	en casos con viga-cadena
$L' = L$	$H' = 3H/5$	en casos con techo rígido

## Propiedades del Adobe

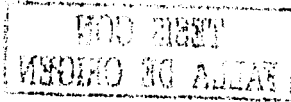
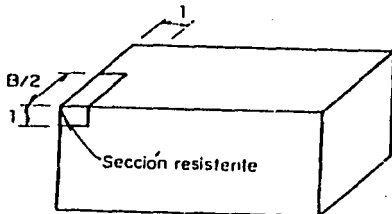


Fig. 52: Franjas de ancho unitario que deben considerarse para determinar el peso por unidad de longitud al calcular el momento flexionante en la esquina. Fuente: MELI, 1994: 56.



El momento flexionante por unidad de longitud generado en las esquinas de una estructura de adobe, se puede calcular mediante:

$$M = C \cdot w \cdot x^2/k$$

donde:

C = Ordenada espectral

k = 5 si existe viga-cadena ó 20 si no existe viga-cadena

x = H ó L/2, el menor

w = peso por unidad de longitud, que se determina considerando el peso de una franja de altura unitaria del muro frontal más la mitad del peso del techo y, en su caso, el de la viga.

Este método simplificado se basa en el método de los elementos finitos, obteniendo valores de cortante y momento que oscilan entre el 90 y 135% de los obtenidos con el método de elementos finitos, dando un margen de seguridad razonable.

Las expresiones propuestas con éste método pueden ser aplicables a construcciones de otro material como mampostería de piedra o tabique, que tengan las mismas características de estructuración.



# Capítulo 6

Método  
de los Elementos  
Finitos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

PAID RIGHT  
MAY 19 1954



## Método de los Elementos Finitos

El método de los elementos finitos es uno de los procedimientos que existen para aproximar el comportamiento de una estructura con infinitos grados de libertad por el de otra, con aproximadamente las mismas propiedades físicas y geométricas, pero con un número finito de grados de libertad, cuyas ecuaciones de equilibrio pueden ser expresadas por un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un número limitado de incógnitas.

La formulación del método de los elementos finitos data de 1943, aplicado a problemas de torsión en vigas; pero no es sino hasta 1960 cuando se da su mayor auge debido a los progresos simultáneos que se dieron en el campo de la computación, ya que al igual que el método de las rigideces, éste método da un sistema de ecuaciones simultáneas grande, por lo que su solución requiere de equipos de cómputo, puesto que la mayor parte de las estructuras en ingeniería son de naturaleza continua, por lo que su comportamiento no es posible expresarlo en forma precisa en función de un número pequeño de variables discretas.

En muchas ocasiones, dentro de la ingeniería, es preciso determinar la distribución de esfuerzos y deformaciones dentro de un medio continuo elástico, lo cual nos permite abarcar problemas bidimensionales, sólidos de revolución, flexión de placas y sólidos tridimensionales. En el caso de flexión de placas, el análisis se limita al estudio de la deformación del plano medio de la placa.

En todos los casos, el número de interconexiones entre un elemento finito cualquiera rodeado por

## Método de los Elementos Finitos

fronteras imaginarias y los elementos vecinos al él es infinito, lo cual hace a la estructura continua y el cálculo con un grado de precisión mayor.

El procedimiento que se sigue consiste en dividir el sistema continuo en un número finito de elementos por medio de líneas o superficies imaginarias, los cuales se suponen conectados entre sí mediante nodos en puntos situados en sus contornos. Además se determina un conjunto de funciones (funciones de forma o de interpolación) que definan el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito, en función de sus desplazamientos nodales.

Adicionalmente se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos que equilibren los esfuerzos y cualquier carga

repartida, relacionando fuerzas y desplazamientos mediante la expresión:

$$P=KA$$

la cual se soluciona con cualquier método para resolver ecuaciones simultáneas. Los desplazamientos nodales, así encontrados, permiten calcular los esfuerzos internos de cada elemento finito, lo cual obliga que exista un equilibrio en los nodos, pero no en las fronteras del elemento. Al reducir el tamaño de los elementos finitos la diferencia entre los esfuerzos de las fronteras disminuye, tendiendo a un campo de desplazamientos continuo.

Desde que irrumpieron los ordenadores digitales en la década de los 60 y hasta la actualidad, el método de los elementos finitos ha tenido un desarrollo espectacular en su aplicación a innumerables campos de la ingeniería.



## 6.1 Elasticidad Bidimensional

Este método logró sus primeros éxitos en su aplicación a problemas bidimensionales, ya que son muchas las estructuras que hacen uso de las hipótesis de elasticidad bidimensional, la cual maneja dos tipos de problemas, los que se clasifican como estado de esfuerzos plano y estado de deformación plana.

Una estructura prismática se encuentra en un estado de esfuerzos plano si una de sus dimensiones (espesor) es mucho menor que las otras dos dimensiones y adicionalmente actúan sobre ella únicamente cargas contenidas en su plano medio. Ejemplos de este tipo de estructuras son las vigas de gran peralte, los contrafuertes de presas, placas cargadas en su plano, etc.

Las fuerzas que se aplican en el plano que contiene a la estructura ( $x, y$  por ejemplo) generan esfuerzos  $\sigma_x, \sigma_y$  y  $\tau_{xy}$ , mientras que los esfuerzos normales y tangenciales a la otra cara del elemento infinitesimal son cero, es decir:  $\sigma_z, \tau_{xz}$  y  $\tau_{yz}$ .

Fig. 53: Estado de esfuerzos planos en un elemento infinitesimal.

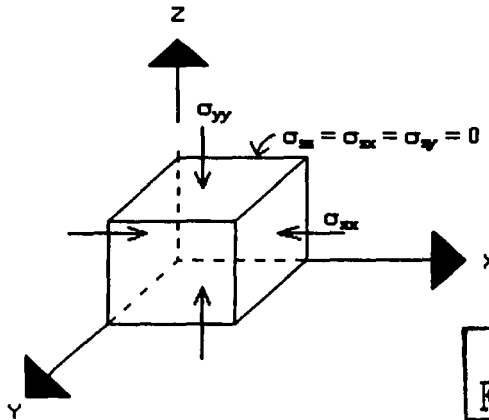
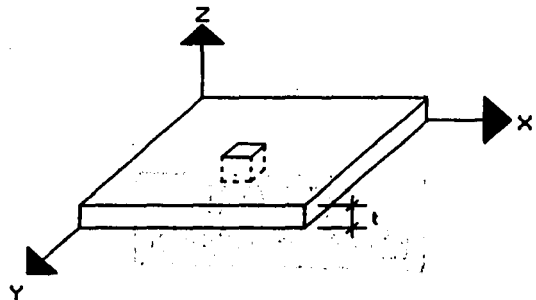
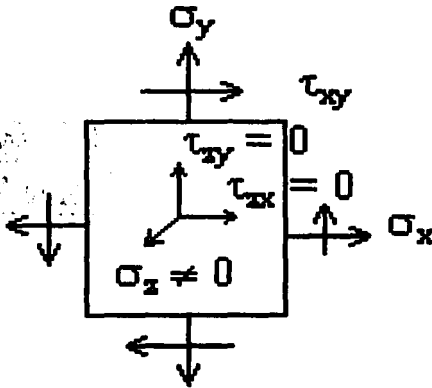


Fig. 54: Estado de esfuerzos planos.



## Método de los Elementos Finitos

Fig. 55: Estado de deformaciones planas.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se dice que un cuerpo está en estado de deformaciones planas, si una de sus dimensiones (longitud) es mucho mayor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas uniformemente distribuidas a lo largo de toda su longitud y contenidas en planos ortogonales al eje que une los centros de gravedad de sus distintas secciones transversales, o dicho de otra forma, cuando la deformación unitaria en dirección  $z$  es igual a cero y el esfuerzo en la misma dirección es diferente de cero, es decir:

En la práctica este caso se presenta en estructuras para las cuales la dirección  $z$  es mucho mayor que las otras dos y la sección perpendicular al eje  $z$  es constante. Para su análisis se toma una sección representativa de espesor unitario, tal es el caso de las presas de gravedad, vertederos de demasías, túneles, presas interactuando con el terreno de cimentación, estabilidad de taludes, terraplenes, cascarones, etc.

## 6.2 Elemento Finito Triangular de 3 Nodos

El elemento de 3 nodos, también llamado de Turner, ha sido aplicado al cálculo de presas de gravedad, aunque se ha visto que su precisión es limitada obligando a emplear mallas muy tupidas.

Un elemento triangular de 3 nodos se caracteriza por los números de sus nodos  $i, j, k$  y sus coordenadas  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  y  $(x_3, y_3)$ .

Considerando un elemento aislado, se pueden expresar los dos desplazamientos cartesianos de un punto cualquiera del interior del elemento en función de los desplazamientos de sus nodos como:

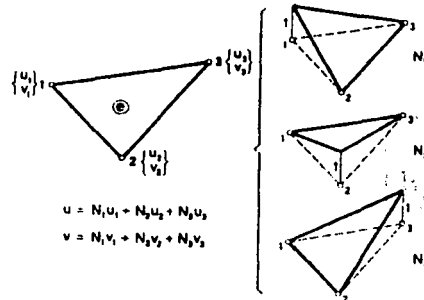
$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3$$

$$v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3$$

donde  $(u_i, v_i)$  y  $N_i$  son los desplazamientos horizontal y vertical y la función de forma del nodo  $i$  del elemento respectivamente.

La representación gráfica de las funciones de forma se muestran en la figura:

las cuales toman el valor unidad en un nodo y cero en los otros dos.



$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3$$

$$v = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3$$

La ecuación de equilibrio global de la malla se obtiene estableciendo que la suma de las fuerzas nodales de equilibrio en cada nodo debe ser igual a la fuerza nodal exterior, es decir:

$$\sum q_i^{(e)} = p_i$$

por consiguiente, las ecuaciones de equilibrio de la malla se pueden obtener a partir de las contribuciones de

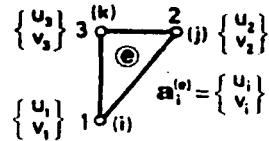
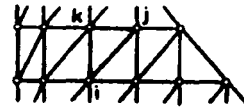


Fig. 56: Discretación de una estructura en elementos triangulares de 3 nodos. Fuente: ONATE: 169

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 57: Funciones de forma del elemento triangular de tres nodos. Fuente: ONATE: 172.

las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas nodales equivalentes de los diferentes elementos; tras el ensamblaje, la ecuación matricial se expresa como:

$$K a = f$$

donde  $K$ ,  $a$  y  $f$  son la matriz de rigidez, el vector de desplazamientos nodales y el vector de fuerzas nodales equivalentes de toda la malla.

## Método de los Elementos Finitos

### 6.3 Elemento Finito Rectangular de 4 Nodos

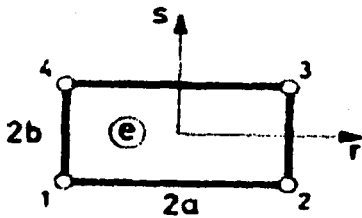
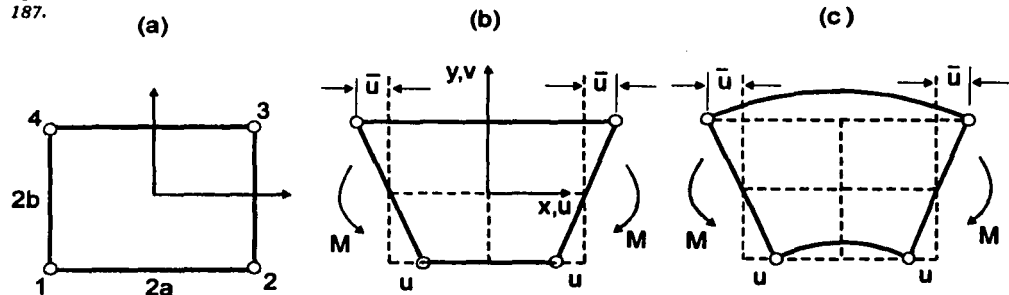


Fig. 58: Discretación de elementos rectangulares de cuatro nodos en los ejes locales  $x$  y  $y$ . Fuente: OÑATE: 183.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 59: Elemento rectangular de cuatro nodos sometido a un estado de flexión pura a) Geometría Inicial, b) Deformación del Elemento, c) Deformación Correcta de un segmento de viga de flexión. Fuente: OÑATE: 187.



Este elemento es el más simple de los elementos rectangulares y su desarrollo fue posterior al elemento triangular de Turner.

El elemento rectangular de cuatro nodos ofrece un alto grado de precisión para problemas en los que el comportamiento de la estructura sea esencialmente de tracción o compresión pura, mientras que en problemas en los que predomina la flexión dicho elemento es de poca precisión, siendo necesario utilizar mallas muy cerradas para obtener resultados aceptables.

Como se mencionó anteriormente el método se basa en determinar un campo de desplazamientos para cada uno de los nodos, en base a las condiciones de frontera que éstos presentan. Este campo de desplazamientos se determina mediante la teoría de deformaciones, que establece que una partícula  $P$  que se encuentra localizada en un cuerpo indeformado con coordenadas  $(x, y, z)$ ; bajo la deformación, la partícula se moverá a un punto  $(x^*, y^*, z^*)$ .

## Método de los Elementos Finitos

El campo de desplazamientos que se emplea, se basa en las coordenadas locales  $r, s$  y se puede observar de la siguiente forma:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 s + \alpha_4 rs$$

$$v = \alpha_5 + \alpha_6 r + \alpha_7 s + \alpha_8 rs$$

que al aplicar las condiciones de frontera y ordenando en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Al resolver el sistema anterior para encontrar el vector  $\{\alpha\}$  y sustituyéndolo en el campo de desplazamientos, se puede llegar a:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \\ 0^1 & 0^2 & 0^3 & 0^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \end{bmatrix}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





## 6.4 Teoría de Placas Delgadas y Gruesas

Una placa se define como un sólido paralelepípedo en el que una de sus dimensiones (espesor) es mucho más pequeño que las otras dos.

La teoría de Kirchhoff de placas delgadas se basa en que los puntos del plano medio de la placa sólo se mueven verticalmente en igual magnitud:

$$u = v = 0$$

y la mayor parte de éstas teorías se basan en la hipótesis de deformación recta de la normal, aunque no sea más que una aproximación pues ésta se distorsiona con la deformación. Debe añadirse que la hipótesis de ortogonalidad de la normal sólo se cumple para placas de pequeño espesor, pues en placas de moderado y gran espesor la distorsión aumenta con la deformación.

Así mismo, el vector de movimientos contiene los desplazamientos y giros de un punto del plano medio de la placa:

$$u = \{ \omega, \theta_x, \theta_y \}^T = \{ \omega, \delta w / \delta x, \delta w / \delta y \}^T$$

TRABAJO ENTREGADO  
 15/02/2012

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

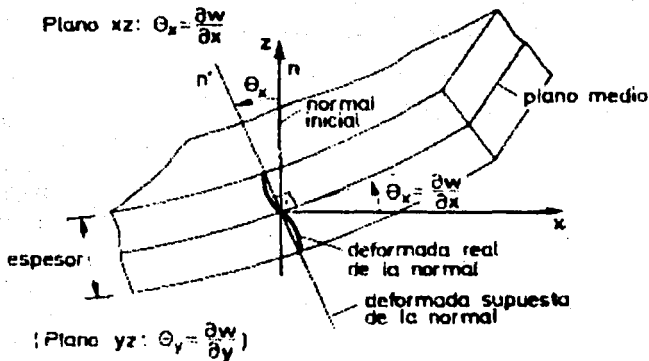


Fig. 60: Deformación del plano medio de una placa delgada y giro de la normal. Fuente: OÑATE: 324.

# Método de los Elementos Finitos

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

WORLD SCIENTIFIC

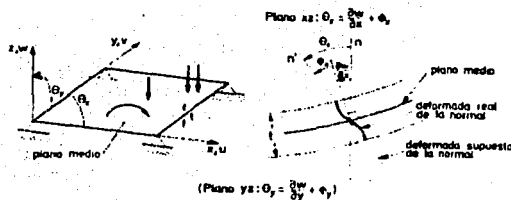


Fig. 61: Teoría de placas de Reissner-Mindlin. Fuente: OÑATE: 361.

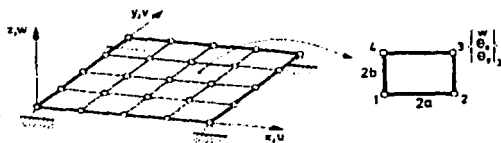


Fig. 62: Discretización de una placa con elementos de placa de Reissner-Mindlin rectangulares de cuatro nodos. Fuente: OÑATE: 369.

Esta teoría se limita a elementos de placas delgadas, con una relación espesor/ancho  $\leq 0.10$ .

La teoría de Reissner-Mindlin es válida para placas de pequeño y gran espesor, lo cual justifica su creciente popularidad. Las hipótesis en las que se basa son básicamente las mismas que la teoría de Kirchhoff, salvo la hipótesis de que durante la deformación de la placa la normal al plano medio de ésta no necesariamente es ortogonal a la deformada del plano medio.

El campo de desplazamientos se define de igual forma al de Kirchhoff:

$$u = \{w, \theta_x, \theta_y\}^T$$

donde:  $\theta_x = \delta\omega/\delta x + \phi_x$  y  $\theta_y = \delta\omega/\delta y + \phi_y$

de los cuales, el primer miembro indica el cambio de pendiente del plano medio y los segundos se deben al giro adicional de la normal al no permanecer necesariamente ortogonal a la deformada del plano medio, siendo ésta la diferencia sustancial entre ambas teorías de placas.

Para la formulación de los elementos finitos se discretiza en una malla de elementos isoparamétricos de clase  $C_0$ , como se muestra en la figura (OÑATE: 321-430):

# Capítulo 7

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE EDUCACIÓN Y ARTES

Análisis  
del Edificio

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

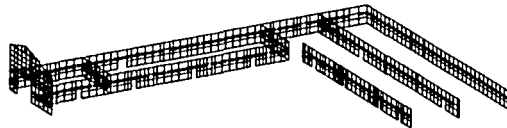
FALLA DE ORIGEN  
TESIS CON

Para realizar el análisis del edificio es indispensable contar con programas de cómputo que nos permitan agilizar el trabajo, de otra manera sería muy tedioso y casi imposible resolver los sistemas de ecuaciones resultantes; para lo cual, en éste caso se empleó el programa STAAD-III que tiene la particularidad de resolver problemas complejos con la aplicación del elemento finito.

El primer paso consiste en modelar toda la geometría del edificio por medio de elementos finitos, procurando que el mallado que se realice sea lo más detallado para obtener resultados cien por ciento confiables. En éste caso se emplearon, en su mayoría, elementos finitos de 4 nodos, también llamados elementos "shell", y algunos otros elementos de 3 nodos para definir las zonas que tienen geometría triangular.

Después de haber modelado toda la estructura, se procedió a darle todos

los espesores de los muros, así como sus propiedades estructurales tales como el módulo de elasticidad ( $E$ ), módulo de Poisson, densidad, entre otras. Debe mencionarse que la estructura no está hecha de un solo material, sino que es a base de mampostería de piedra braza y adobe, para lo cual se consideró que la mampostería de piedra tiene un módulo de elasticidad  $E = 80,000 \text{ ton/m}^2$ , éste valor fue estimado en base al módulo de elasticidad de la piedra y del mortero, pues no se han realizado pruebas de éste material y lo correcto sería contar con estudios de la mampostería de piedra de la región; de las pocas pruebas que se han realizado en especímenes cúbicos se han obtenido resistencias del orden de  $200 \text{ kg/cm}^2$  para la sillería o mampostería de primera y de  $120\text{-}150 \text{ kg/cm}^2$  para la mampostería ordinaria, los cuales nos indican que son valores muy inferiores a los de la piedra sola y mayores que la resistencia del mortero, debido a lo cual consideramos un valor conservador. En cuanto a la densidad de éste material se consideró un peso volumétrico de  $2.6 \text{ ton/m}^3$ .



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 63: Malla de elementos finitos.

## Análisis del Edificio

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

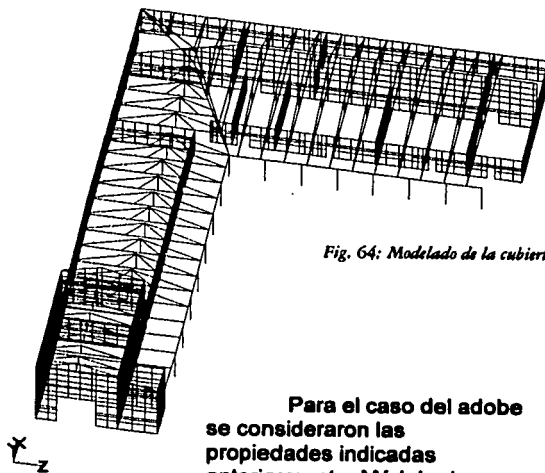


Fig. 64: Modelado de la cubierta.

Para el caso del adobe se consideraron las propiedades indicadas anteriormente: Módulo de elasticidad  $E = 25,000 \text{ ton/m}^2$ , peso volumétrico  $\gamma = 1.8 \text{ ton/m}^3$  y coeficiente de Poisson de  $\nu = 0.3$ .

En el caso de la cubierta, ésta fue modelada de acuerdo a sus respectivas propiedades geométricas y se consideró que las vigas apoyan directamente sobre los muros, para lo cual se consideraron las vigas articuladas a los muros, liberando los momentos. El módulo de elasticidad de la madera se consideró de  $E = 400,000 \text{ ton/m}^2$ , que

corresponde al módulo de elasticidad mínimo para la madera que permanece verde o con un contenido de humedad mayor del 18% aún estando en servicio.

Adicionalmente, se modelaron las columnas de piedra, que son las que reciben la descarga de la cubierta, con un módulo de elasticidad promedio de la piedra braza de  $E = 200,000 \text{ ton/m}^2$  y un peso volumétrico de  $2.6 \text{ ton/m}^3$ , todas las columnas debidamente ligadas a la estructura y en el apoyo inferior se consideraron articuladas, al igual que los muros, ya que pueden girar libremente sin desplazarse.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Finalmente el modelado implica también especificar las cargas a las que está sometida toda estructura, independientemente del peso propio. En éste caso el edificio posee cierta carga muerta que le transmite el peso propio de la teja:  $\omega = 150 \text{ kg/m}^2$ , la cual se dispuso mediante cargas lineales uniformemente distribuidas sobre las vigas por medio del análisis de áreas tributarias. De la misma forma se incluyeron las cargas que le proporciona el entablado de madera de 2" de espesor, por lo que el peso máximo de la madera húmeda por unidad de área es de:  $\omega = 0.0508 \text{ ton/m}^2$ . Además, en la capilla que consta de 2 niveles, el entepiso es a base de tejamanil, el cual es un conjunto de madera y arena, para el cual se estimó un peso por  $\text{m}^2$  de:  $\omega = 0.5 \text{ ton/m}^2$ .

Fig. 65: Apoyos articulados, con restricción de los desplazamientos.

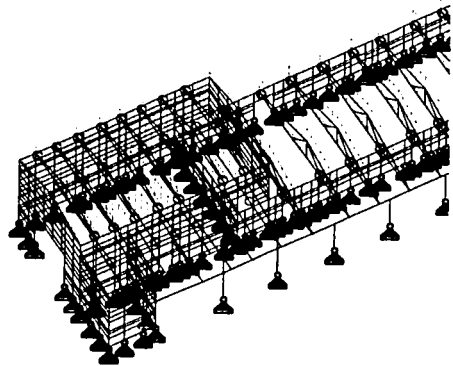


Fig. 66: Cargas inducidas a las vigas de madera por el peso propio de la cubierta.

## Análisis del Edificio

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

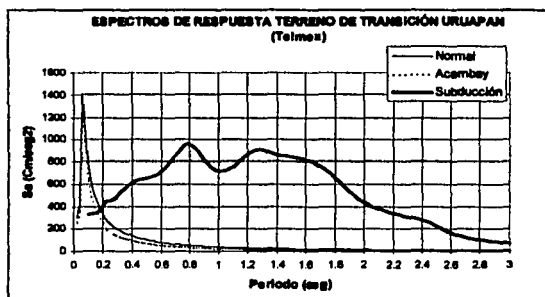


Fig. 67: MARTÍNEZ, 2000: 78.

Independientemente del peso propio de la estructura y las cargas muertas a las que está sometida, se simuló una carga de sismo en base a los espectros de respuesta obtenidos del estudio de peligro sísmico realizado para la ciudad de Uruapan en terreno de transición, introduciendo los espectros correspondientes tanto a los sismos normales como los de subducción, asignando los valores que definen la curva, es decir, tabulando el periodo de vibración contra la aceleración experimentada por diversas estructuras que se idealizan de un grado de libertad para cada particular movimiento del terreno. La diferencia de utilizar un espectro de respuesta a un espectro elástico de diseño radica en que la meseta que forma el espectro de diseño comprende todos los posibles rangos de aceleraciones o envolvente, mientras que el espectro de respuesta determina específicamente el tipo de pseudoaceleración a que puede someterse la estructura. Debido a lo anterior, se definió la carga del temblor en base a los espectros de respuesta que se muestran a continuación:

Cabe mencionar que al realizar los primeros análisis de los resultados se obtuvieron periodos de vibración muy largos, esto debido a que la cubierta se movía muy fácilmente y nos arrojaba datos erróneos, por lo que fue necesario restringir algunos movimientos de los nudos que conforman la cubierta, de tal forma que se formara un diafragma semirígido, convirtiendo nuestra



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

estructura inicialmente flexible en otra más rígida pero sin llegar a rigidizarla de manera irreal. Después de analizar los resultados obtenidos podemos percatarnos de que el periodo máximo de vibración de la estructura oscila en los 0.48 segundos y nos proporciona resultados confiables.

En base a los diagramas de contornos de esfuerzos obtenidos, es posible determinar si los esfuerzos actuantes cumplen con los permisibles de los materiales. Para el caso de la mampostería las NTC-96 marcan algunas fórmulas para muros diafragma, éstos teóricamente son los que se encuentran rodeados por las vigas y columnas de un marco estructural al que proporcionan rigidez ante cargas laterales, pero en nuestro caso como se trata de muros de gran espesor, éstos rigidizan de sobremanera la estructura y evitan cualquier posibilidad de volteo. Sin embargo, éstas fórmulas marcadas por las NTC están restringidas a muros esbeltos, por lo que no son aplicables en nuestro análisis y procederemos a revisar los esfuerzos actuantes en base a las resistencias a compresión y a cortante de la mampostería y del adobe. Cabe recalcar que nuestra revisión se basa en la Teoría Elástica, fundamentada en esfuerzos de trabajo y cuyo objetivo es comparar éstos últimos con los esfuerzos permisibles de los materiales, especificados como una fracción de sus resistencias.

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

Después de revisar los diagramas de esfuerzo para todas las combinaciones de carga posibles se observa que en ningún caso se presentan esfuerzos de tensión producto de la flexión que pudieran dañar la mampostería. Sin embargo, los esfuerzos más representativos son aquellos que corresponden a la combinación de cargas permanentes, 30% del sismo en dirección X y el 100% del sismo en dirección Z (CP + 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub>) para sismos de subducción, como se muestra a continuación:

Para el caso de la mampostería de piedras naturales unida con mortero de resistencia mayor que 50 kg/cm<sup>2</sup> se tiene una resistencia de  $f_m^* = 200$  ton/m<sup>2</sup>, mientras que el esfuerzo cortante resistente de diseño permisible de la mampostería es:  $v^* = 6.0$  ton/m<sup>2</sup>. El adobe en cambio, posee una resistencia de diseño en compresión de  $f_m^* = 134$  ton/m<sup>2</sup> y un esfuerzo cortante permisible de  $v^* = 12.0$  ton/m<sup>2</sup>.

# Análisis del Edificio



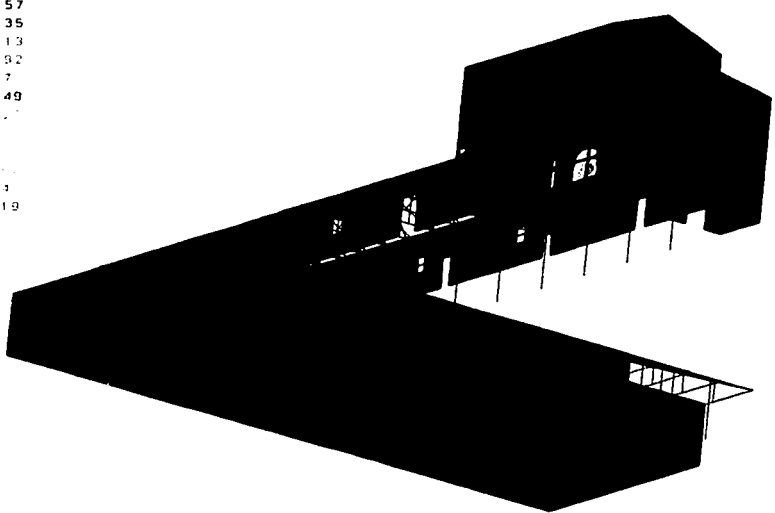
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 68: Diagrama de contornos de esfuerzos flexionantes máximos.

El ángulo de visión está ubicado X Y Z  
30° 130° 20°

- STRESS CONTOUR
- 3.443
  - 6.420
  - 9
  - 11.78
  - 14.57
  - 17.35
  - 20.13
  - 22.92
  - 25.7
  - 28.49
  - 31.27
  - 34.05
  - 36.84
  - 39.62
  - 42.41
  - 45.19

STD LOAD = 15 KN/ELEM



Huatápera

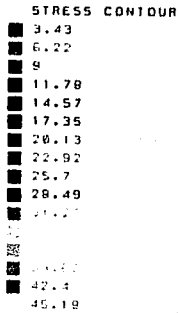
CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)

# Analisis del Edificio

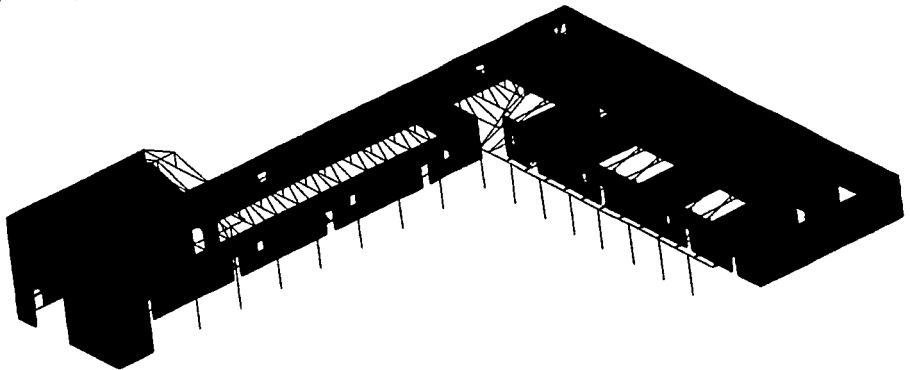
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 69: Diagrama de contornos de esfuerzos flexionantes máximos X Y Z  
40° 30° 30°



STDR LOADS MN/ELEN 15



Huatápera

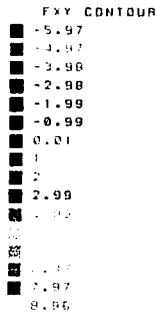
CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)

# Análisis del Edificio

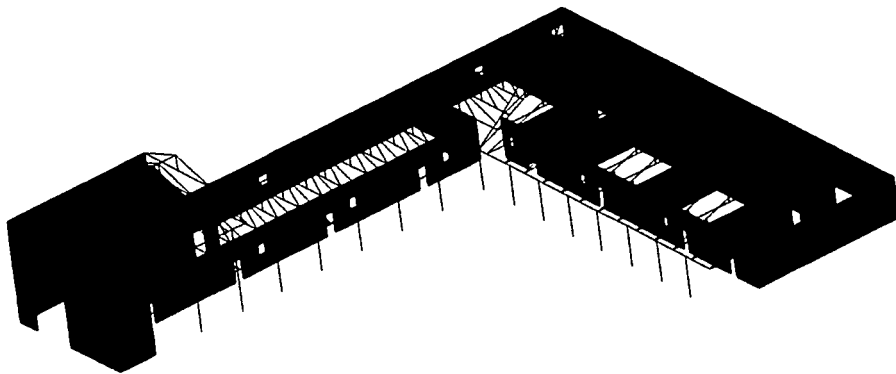
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fig. 70: Diagramas de contornos de esfuerzos cortantes máximos X Y Z  
40° 30° 30°

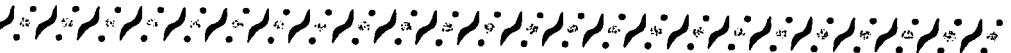


STOR LOAD =  $\frac{HN}{ELEM}$   
19



Huatápera

CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)



# Análisis del Edificio

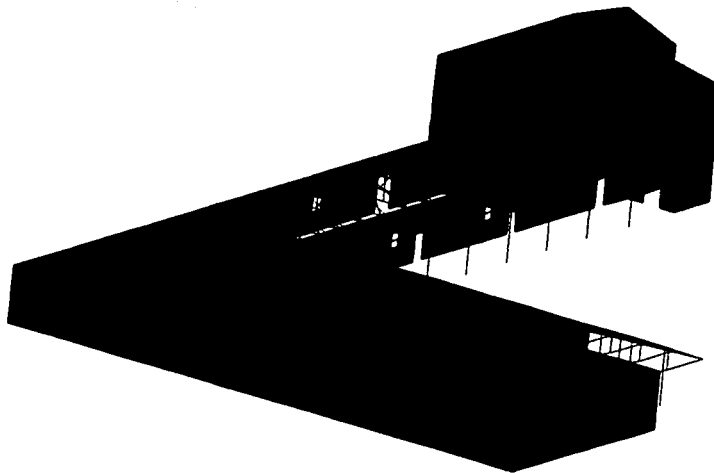
MOD 2120  
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Fig. 71: Vista en perspectiva de los contornos de esfuerzos cortantes X Y Z  
 30° 130° 20°

FXY CONTEUR

■	-5.97
■	-4.97
■	-3.98
■	-2.98
■	-1.99
■	-0.99
■	0.01
■	1
■	2
■	2.98
■	3.98
■	4.97
■	5.97
■	6.97
■	7.97
■	8.96

STCR LOAD =  $\frac{MN/ELEM}{19}$



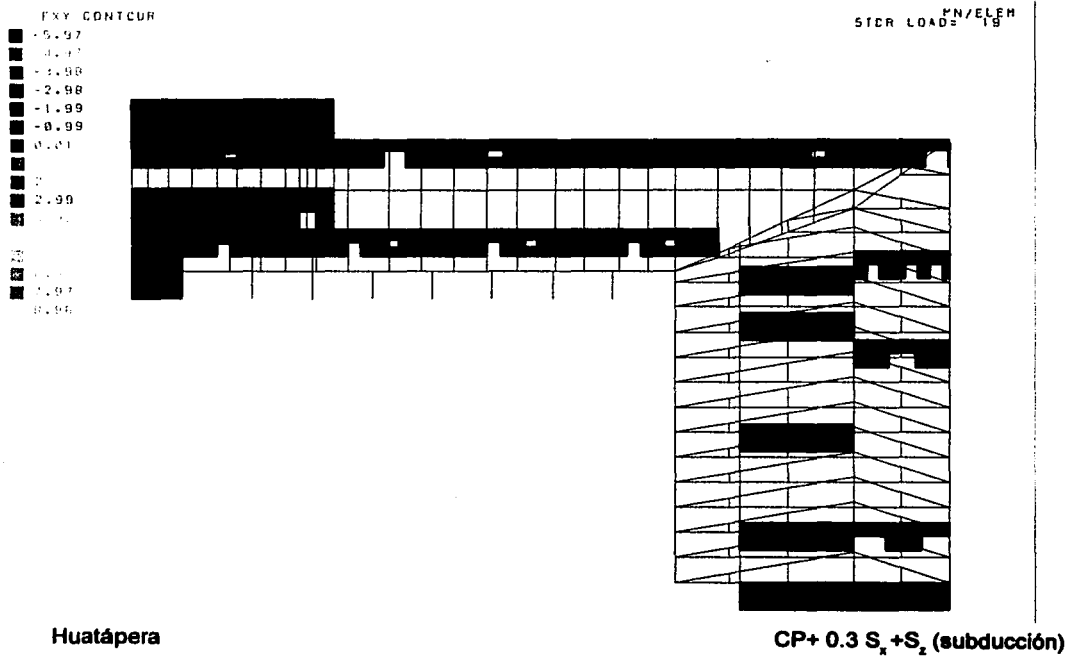
Huatápera

CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)

# Análisis del Edificio

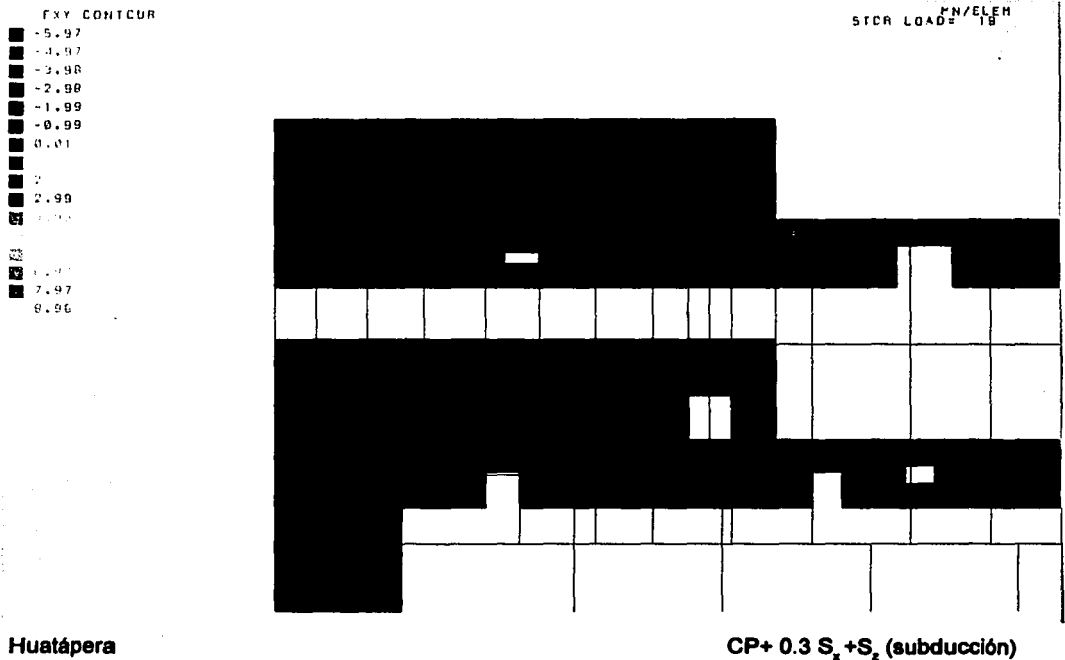
UNIVERSIDAD DE GUATEMALA  
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Fig. 72: Vista lateral de los contornos de esfuerzos cortantes con un ángulo de X Y Z  
 60° 0° 0°



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA Y CIENCIAS  
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 73: Detalle de la vista de la página anterior.

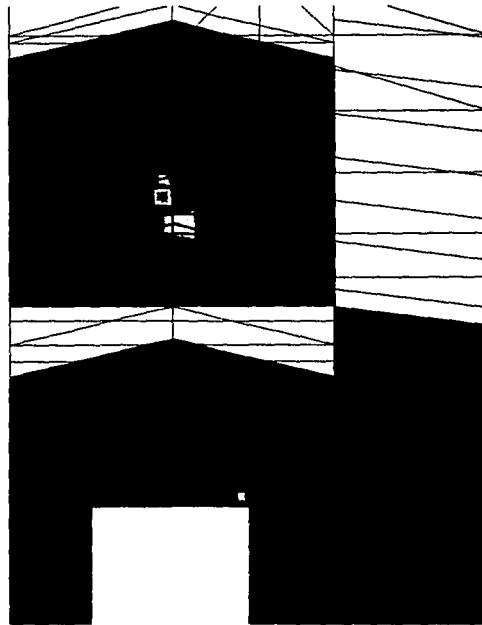
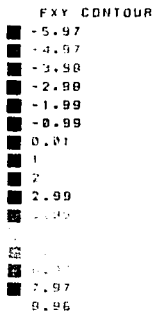


# Análisis del Edificio

NOO 21221  
 VOLUMEN NO ALLIAT

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Fig. 74: Vista aérea de los esfuerzos cortantes  
 con una rotación de X Y Z  
 90° 40° 90°



STD. LOADS <sup>KN/ELEM</sup> 15

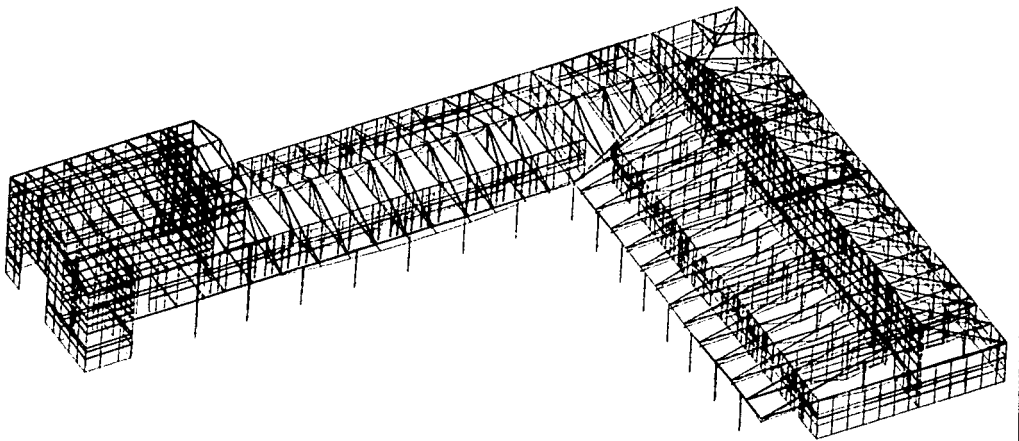
Huatápera

CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*Fig. 75: Deformación del edificio.*



**Huatápera**

**CP+ 0.3 S<sub>x</sub> + S<sub>z</sub> (subducción)**

# Análisis del Edificio

Cuadro 13: Esfuerzos cortantes críticos.

Muro Externo Norte-Sur		CP+ 0.3 S <sub>x</sub> + S <sub>z</sub> (subducción)	
NUDO	ESF. CORTANTE	NUDO	ESF. CORTANTE
1	-2.54	44	0.09
2	2.08	45	0.30
3	2.01	46	0.09
4	2.52	47	1.64
5	-0.74	48	2.12
6	-1.63	49	3.41
7	-2.24	50	2.80
8	-2.63	51	2.84
9	-1.67	52	3.89
10	-3.06	53	3.73
11	-1.55	54	2.94
12	-0.53	55	2.98
13	-0.47	56	2.59
14	-2.11	57	1.93
15	-1.59	58	1.29
16	-1.55	59	0.71
17	-1.47	60	-1.26
18	-1.24	61	-1.55
19	-0.70	62	-0.82
20	-2.07	63	2.32
21	-3.49	1013	4.07
22	-5.72	1014	2.55
23	-1.81	1015	0.66
24	2.71	1016	1.83
25	-1.11	1312	-3.56
26	-1.14	1313	-1.59
27	-1.52	1314	-0.60
28	2.32	1315	-0.32
29	4.95	1316	-0.33
30	-1.43	1317	-0.25
31	-4.30	1318	-0.18
32	-0.91	1319	-0.30
33	0.26	1320	-0.23
34	-1.81	1321	0.21
35	-0.36	1322	1.47
36	-1.14	1323	1.51
37	-0.66	1324	1.56
38	-0.47	1325	1.79
39	0.08	1326	1.88
40	0.94	1327	1.42
41	-0.86	1328	1.47
42	-0.58	1329	1.42
43	-0.84	1330	1.39

Cuadro 14: Esfuerzos cortantes críticos.

Muro Externo Norte-Sur		CP+ 0.3 S <sub>x</sub> +S <sub>y</sub> (subducción)	
NUDO	ESF. CORTANTE	NUDO	ESF. CORTANTE
1331	1.49	1378	-0.34
1332	0.64	1379	0.14
1333	0.9	1382	-0.70
1334	1.12	1383	-0.81
1335	1.17	1384	-0.67
1336	1.19	1385	0.12
1337	1.07	1386	-1.00
1338	1.15	1391	-0.65
1339	1.08	1392	-0.79
1340	0.78	1393	-0.92
1341	-0.15	1401	0.18
1342	1.51	1408	-0.81
1343	1.18	1908	-0.64
1344	1.18	1909	-0.50
1345	1.14	1910	-1.19
1346	1.04	1911	-1.86
1347	1	1912	-0.86
1348	1.07	1913	-0.22
1349	1.22	1914	0.34
1350	1.6	1915	0.35
1351	1.23	1916	0.11
1352	1.82		
1353	1.07		
1354	0.79		
1355	0.81		
1356	0.86		
1357	0.56		
1358	0.4		
1359	0.1		
1360	0.08		
1361	-0.13		
1362	-0.52		
1363	-0.95		
1364	-0.93		
1365	-0.58		
1366	-0.21		
1367	-3.02		
1368	-2.74		
1369	-1.82		
1370	-1.14		
1371	-0.13		
1372	-2.38		
1377	-0.09		

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Analisis del Edificio

Cuadro 15: Esfuerzos cortantes críticos.

Muro Interior de la Capilla		CP+ 0.3 S <sub>x</sub> +S <sub>z</sub> (subducción)	
NUDO	ESF. CORTANTE	NUDO	ESF. CORTANTE
1277	-2.29	1925	-0.53
1278	-2.60	1926	-0.35
1279	-3.66	1927	-0.31
1280	-5.50	1928	-0.76
1281	-6.96	1929	0.10
1282	0.07	1930	0.18
1283	-2.31	1931	0.37
1284	-2.11	1932	0.60
1285	-1.76	1933	1.20
1286	-1.55	1934	1.55
1287	0.05	1935	2.25
1288	0.47	1936	1.86
1289	1.75	1937	0.95
1290	3.15		
1291	1.59		
1292	8.96		
1293	4.83		
1294	2.96		
1295	1.55		
1296	1.07		
1297	1.50		
1298	1.82		
1299	2.20		
1300	1.92		
1301	-0.56		
1302	1.03		
1303	0.55		
1304	1.33		
1305	1.80		
1306	1.90		
1307	2.21		
1308	1.95		
1309	1.54		
1310	1.49		
1311	1.86		
1917	-2.19		
1918	-1.95		
1919	-0.62		
1920	-0.67		
1921	-1.23		
1922	-1.64		
1923	-1.10		
1924	-0.68		

## Análisis del Edificio

Cuadro 16: Esfuerzos cortantes críticos.

Muro Interno Norte-Sur		CP+ 0.3 S <sub>x</sub> + S <sub>z</sub> (subducción)	
NUDO	ESF. CORTANTE	NUDO	ESF. CORTANTE
308	-2.85	351	-0.64
309	-1.92	352	0.20
310	-1.51	353	0.87
311	-0.48	354	1.73
312	-1.85	355	0.74
313	-3.39	356	0.18
314	-3.90	357	0.01
315	-3.78	358	2.11
316	-3.24	359	-0.24
317	-2.77	360	-0.05
318	-0.95	361	2.25
319	0.94	362	2.59
320	-0.20	363	-1.08
321	-0.65	364	-1.06
322	-0.91	365	-0.53
323	-2.36	366	3.45
324	-2.29	367	2.40
325	-0.61	368	-0.22
326	-1.22	369	3.87
327	-1.22	370	3.55
328	-2.55	371	1.41
329	-4.42	372	-0.36
330	-5.72	373	0.28
331	0.85	374	1.95
332	-1.29	375	0.95
333	-0.54	1215	-0.24
334	0.80	1216	-0.25
335	4.58	1217	-0.36
336	3.58	1218	-0.53
337	-2.10	1219	-0.55
338	-0.88	1220	-0.93
339	0.10	1221	-0.88
340	-0.56	1222	-0.56
341	-0.48	1223	-0.32
342	-0.28	1224	-1.82
343	0.12	1225	-1.11
344	0.25	1226	-0.12
345	0.39	1227	0.44
346	1.80	1228	0.80
347	1.56	1229	0.84
348	2.81	1230	-0.29
349	2.22	1231	-0.29
350	3.10	1232	-0.23

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Análisis del Edificio

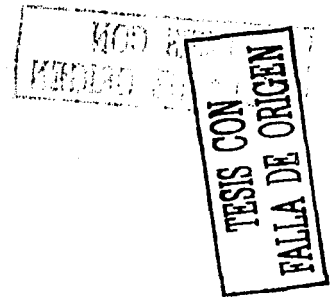
Cuadro 17: Esfuerzos cortantes críticos.

Muro Interno Norte-Sur		CP+ 0.3 S <sub>x</sub> +S <sub>y</sub> (subducción)	
NUDO	ESF. CORTANTE	NUDO	ESF. CORTANTE
1233	-0.14	1276	1.06
1234	-0.06	1938	0.13
1235	-0.98	1939	0.83
1236	-0.29	1940	1.24
1237	-0.08	1941	0.48
1238	-0.02	1942	-0.60
1239	0.02	1943	-1.58
1240	0.09	1944	-1.16
1241	0.06	1945	-0.58
1242	-0.05	1946	-0.57
1243	-0.32	1947	-0.36
1244	-1.14	1948	0.11
1245	-0.03	1949	-0.49
1246	-0.17	1950	0.35
1247	0.01	1951	0.03
1248	0.09	1952	0.09
1249	0.11	1953	-0.57
1250	0.03	1954	-0.66
1251	0.08	1955	-0.06
1252	0.11	1956	0.59
1253	0.09	1957	0.60
1254	-0.74	1958	2.16
1255	-0.16	1959	1.03
1256	0.21	1960	0.76
1257	0.16	1961	0.27
1258	-0.16	1962	0.25
1259	-0.40	1963	0.23
1260	-1.24	2089	-1.54
1261	-0.91	2090	0.98
1262	-0.21	2091	0.89
1263	0.31	2092	0.68
1264	-0.06	2093	0.44
1265	0.80	2094	-0.10
1266	-1.43	2095	0.07
1267	-2.04	2096	-1.16
1268	-2.34	2098	-1.78
1269	-2.03	2099	-2.82
1270	1.37	2100	-1.59
1271	-0.06	2101	-2.53
1272	1.17	2102	-1.67
1273	1.17	2103	-1.15
1274	1.17	2104	-0.42
1275	0.60	2105	-0.27

## Análisis del Edificio

Cuadro 18: Esfuerzos cortantes críticos.

CP+ 0.3 S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (subducción) Muro Interno Norte-Sur	
NUDO	ESF. CORTANTE
2106	-0.07
2107	0.04
2108	0.04
2109	0.00
2110	0.19
2112	0.39
2113	-0.21
2114	-0.12
2115	0.06
2116	0.16
2117	0.06
2118	0.67
2119	1.06
2120	0.67
2121	0.96
2122	-0.81
2123	1.03
2124	1.31
2125	0.71
2126	-2.50
2127	3.11
2128	1.39
2129	1.28
2130	1.42
2169	-3.19



## Análisis del Edificio

En base a los diagramas de contornos de esfuerzos flexionantes máximos obtenidos se puede decir que éstos no representan riesgo alguno para el edificio, puesto que ninguna de las combinaciones excede las resistencias de diseño en compresión tanto para el adobe como para la mampostería de piedra. En cambio, el caso crítico se puede presentar con el cortante, pues la resistencia a cortante de ambos materiales constructivos es muy pequeña y se exceden algunos valores permisibles.

Para el caso del muro de mampostería de piedra N-S localizado al oeste y que colinda con la calle Vasco de Quiroga, se puede observar que el cortante actuante excede al esfuerzo permisible, en la zona en que la rigidez del edificio cambia debido al incremento de altura que se presenta, pudiendo ocasionar daños que posiblemente se reflejen como agrietamientos diagonales de los muros, tanto

en la planta alta del muro como en la planta baja. Adicionalmente se genera una concentración de esfuerzos mayores en los huecos de puertas y ventanas, pues el área efectiva para resistir cortantes se reduce drásticamente.

Este daño mencionado anteriormente sobre el muro de mampostería podría ocasionar, a su vez, daños al muro de adobe en planta alta que está perpendicular al anterior. Puesto que la planta del edificio es rectangular es muy común que las esquinas sean propensas a agrietarse, perdiendo apoyo y resistencia al volteo.

En el resto de los muros de adobe los esfuerzos mayores se generan en los huecos de puertas y ventanas y, especialmente, en la zona cercana al cambio de rigidez de la estructura. También existe una concentración de esfuerzos en la unión de muros perpendiculares, que posiblemente redunde en un lento pero progresivo debilitamiento de la estructura con cada sismo intenso que se presente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



# Conclusiones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

120

1950  
MAY 18 1950  
MAY 18 1950

## Conclusiones

Es posible que el comportamiento que presentó el edificio de la Huatápera ante el movimiento generado por el sismo de Santa Juliana de 1858 no fuera tan importante, pues al comparar el periodo de 0.49 seg. con el espectro de respuesta para sismos normales, se puede observar que la ordenada espectral es reducida, lo cual nos indica que las aceleraciones no provocaron fuerzas de inercia de consideración sobre los muros.

Por otro lado, la condición más desfavorable para la estructura la representan los sismos de subducción, debido a que las ordenadas espectrales para 0.49 seg. son de 11.2% de la aceleración de la gravedad (g) para los sismos normales y de 68.3%(g) para los de subducción. Un aspecto muy peculiar, es que aunque la aceleración registrada por el sismo del 19 de Septiembre de 1985 haya sido grande, éste no repercutió significativamente en la estructura debido a que se generó una redistribución de esfuerzos en los robustos muros, ya que ofrecen una mayor resistencia debido a su gran área de cortante. Debemos mencionar, además, que éstos muros proporcionaron una gran rigidez al conjunto en general y permitieron que, específicamente por su inercia propia los muros de adobe no experimentaran daño, además de que la carga actuante sobre la cubierta es reducida .

Al analizar la deformación que pudiera sufrir el edificio ante algún sismo intenso, nos percatamos de que es posible que se genere un efecto mancuerna, pues las zonas externas de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

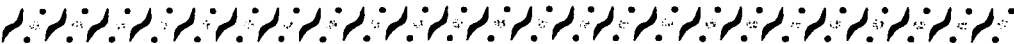
mayor masa evitan su desplazamiento, comparándolo con la parte central que es la que experimenta un desplazamiento mayor.

Debe destacarse que en caso de un futuro evento sísmico la estructura es más sensible a sismos de subducción con periodos del orden de 0.5 seg., en función de los estudios de peligro sísmico, además de que es muy improbable que se llegara a igualar el periodo de vibración de la estructura con el del terreno, por lo que no es posible que la estructura entre en resonancia, pues al comparar el periodo de vibración aproximado para el edificio de Telmex, cuyo periodo es del orden de 0.37 seg., vemos que hay diferencia entre ambos. Sin embargo, se tiene la necesidad de contar con estudios dinámicos del suelo en cuestión y determinar así su periodo natural de vibración exacto.

Se considera que el edificio de la Huatápera es sumamente interesante, sobretodo porque esta estructura ha

permanecido desde inicios del siglo XVI conservando gran parte de sus orígenes, y da muestra de que los materiales constructivos con los que está realizada tienen la suficiente capacidad para soportar grandes movimientos. Sin embargo, no estaría de más realizar pruebas no destructivas en los materiales que nos permitan corroborar las propiedades de éstos, y calibrar los resultados de la presente investigación.

Finalmente, se sugiere tener precaución ante cualquier sismo futuro, como lo indica MARTÍNEZ, 2000: 33-34 en su estudio, donde se considera que la zona sísmica con mayor potencial actualmente, es la costa de Guerrero y se ha calculado un sismo con una magnitud esperada de 8.3. Por lo que debe prestarse atención a las áreas más susceptibles de daño del edificio, que son principalmente las zonas en que se presenta un cambio de altura de los muros. Todo esto con la finalidad de preservar nuestro patrimonio histórico y cultural.

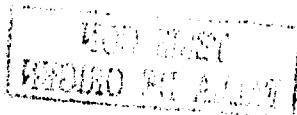


Anexo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1960 INDEX  
DISTRICT OF COLUMBIA

## Cálculo del Periodo de Vibración del Terreno



Para llevar a cabo éste periodo es necesario contar con un sondeo profundo del sitio en cuestión o en su defecto determinar la velocidad de ondas de corte promedio del estrato equivalente.

En éste caso tenemos a nuestro alcance el promedio de las ondas de corte para el terreno del edificio de Telmex, ubicado en la esquina de Morelos y Aldama el cual se estimó como un promedio de todas las velocidades correspondientes a los diferentes estratos. Se consideró éste sitio como uno de los más representativos, ya que no se cuenta con los estudios necesarios realizados para el sitio.

El valor de la velocidad de ondas de corte es de:

$$v_s = 174 \text{ m/s} \quad (\text{MARTÍNEZ, 2000:})$$

De fórmulas empíricas que se han obtenido se tienen las siguientes, que nos permiten calcular los periodos de vibración para los 3 modos de vibración:

$$n=1: \quad T_1 = \frac{4D}{v_s}$$

$$n=2: \quad T_2 = \frac{1 \times 4D}{3 v_s}$$

$$n=3: \quad T_3 = \frac{1 \times 4D}{5 v_s}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

donde D equivale al estrato de terreno y  $v_s$  la velocidad de ondas de corte respectiva.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Al realizar las operaciones respectivas se obtienen los siguientes periodos:

$$\begin{aligned} T &= 0.37 \text{ seg} \\ T^1 &= 0.12 \text{ seg} \\ T^2_3 &= 0.07 \text{ seg} \end{aligned}$$

Por lo que el periodo fundamental del terreno correspondiente al edificio de la Huatápera oscila en los 0.37 seg.

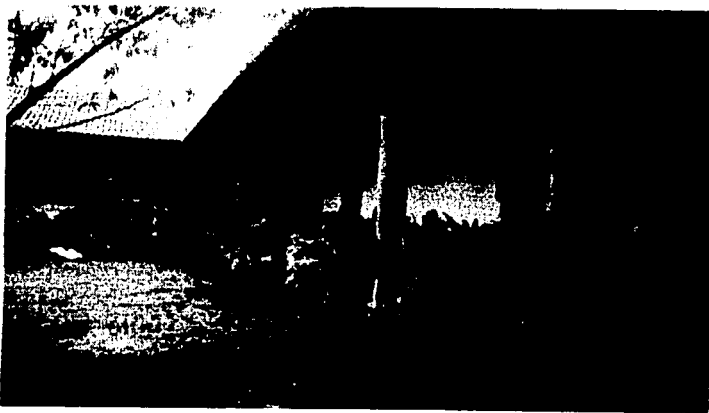
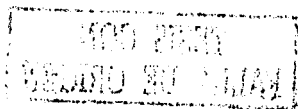


Fig. 76: Detalle de la estructuración del edificio. Fotografía propia.



# Bibliografía



Bazán, Enrique  
Seguridad de casas de adobe ante sismos:  
México, pp. 1-63

Bouwcentrum Argentina  
Mampostería  
Buenos Aires, 1976

Cenapred  
Sismos  
México, No. 2, pp. 1-21

Colindres S., Rafael  
Dinámica de suelos y estructuras: Ed. Limusa  
México, 1983, pp. 17-107

Corona Núñez, José  
Mitología Tarasca: Balsal Editores  
Morelia, Mich., 1984, p. 104

Departamento del Distrito Federal  
Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería: Berbera Editores, S. A. de C. V.  
México, D. F., 1986, pp. 14-15

Dowrick, D. J.  
Diseño de estructuras resistentes a sismos: Ed. Limusa  
México, 1984, pp. 5, 18-19, 278-287

Fernández de Lara, Cuauhtémoc  
La Huatápera: Estudio para su restauración:  
México, 1999; pp. 7-53

Florescano, Enrique.  
Historia General de Michoacán;  
Ed. y publicaciones del Instituto Michoacano de Cultura  
Morelia, Mich., 1989, pp. 78 y 87



## Bibliografía

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fundación ICA  
Edificaciones de mampostería para vivienda:  
México, D. F., 1999, pp. 3-7, 19-33.

Garduño M., Víctor Hugo  
Revisión histórica de la sismicidad en Michoacán, México:  
Revista: Ciencia Nicolaita, No. 11, pp. 57-81, Abril /1996.

Gutiérrez, Ángel  
Historia de Michoacán. Presente y pasado: Ed. Michoacanas  
Morelia, Mich., 1994, p. 29

Herrera Revilla, Ismael  
El sismo del 19 de Septiembre de 1985: Aspectos geofísicos:  
Revista IMCYC, Vol. 23, No. 176, pp. 27-37, Diciembre-Enero/1986

Hurtado Mendoza, Francisco  
La Huatápera. Una joya arquitectónica en extensión  
Revista: Uruapan. Arte, costumbres y tradiciones, No. 02, Abril-Junio del 2000

Kubler, George  
Arquitectura Mexicana del siglo XVI: Fondo de Cultura Económica  
México, D. F., 1982, 683 pp.

Martínez Ruíz, Guillermo  
Peligro sísmico. estudios de sismicidad para la ciudad de Uruapan:  
Morelia, Mich., 2000.

Martínez Ruíz, Guillermo  
Apuntes: Teoría del Elemento Finito:  
Escuela de Ingeniería Civil, U.D.V.

Meli, Roberto  
Seguridad de casas de adobe ante sismos: UNAM  
México, D.F.

**Miranda, Francisco**  
Uruapan; Imprenta Madero, S. A.  
México, 1979, pp. 29-38, 59-87

**Moreno Duarte, Francisco**  
Apuntes históricos de Uruapan; Centro Cultural Félix Parra  
Uruapan, 1987, pp. 2-10

**Ochoa Vega, Daniel**  
Apuntes históricos de Uruapan, ciudad tarasca; Imprenta Bucio  
Uruapan, 1997, pp.18-23

**Oñate, Eugenio**  
Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos;  
España, pp. 1-430

**Padilla Bustos, Manuel**  
Uruapan en su 450 aniversario;  
Uruapan, 1978, pp. 19-22

**Pardo, Mario y Suárez, Gerardo**  
Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern  
México: Seismic and tectonic implications;  
Journal of Geophysical Research, Vol. 100, No. B7, pp. 12,357-  
12,373, Julio 10, 1995.

**Paredes Mendoza, José María**  
Datos generales sobre Uruapan; Impresos Bucio  
Uruapan, 1997, pp. 8-9

**Paredes Mendoza, José María**  
El Centro Histórico de Uruapan;  
Revista: Vértices, No. 259, Enero-2001

**Pavón Rodríguez, Víctor M.**  
Los temblores de tierra;  
México, D. F., 1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Bibliografía

Rosenblueth, Emilio  
Diseño de estructuras resistentes a sismos; Ed. Limusa  
México, 1991, pp. 58-63, 271-306

San Juan Victoria, Carlos  
Historias para temblar; I.N.A.H.  
México, 1987, pp. 11-119

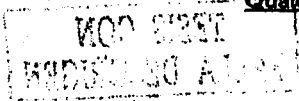
Singh, S. K., Pérez-Rocha, L. E.  
The Great Mexican Earthquake of 19 June 1858: Expected Ground  
Motions and Damage in Mexico City from a Similar Future Event;  
Bulletin of the Seismological Society of America,  
Vol. 86, No. 6, pp.1655-1666, Diciembre 1996

Suárez Reynoso, Gerardo  
El potencial sísmico en México: Una perspectiva histórica;  
México, D. F.

Suárez Reynoso, Gerardo  
Los sismos en la historia de México; Ed. Científicas Universitarias  
México, D. F., 1996

Suter, Max  
Quaternary intra-arc extensión in the central Trans-Mexican volcanic belt;  
Geological Society of America Bulletin, pp. 693-703, June 2001

Valdés, José Francisco  
Nuestro hogar en el espacio; Fondo de Cultura Económica  
México, 1988, pp. 69-98



## Relación de Figuras

### Capítulo I

FIGURA 1: Una vista de la Huatápera.

FIGURA 2: Lienzo de Jucutacato, donde se menciona la ciudad de Uruapan.

FIGURA 3: Una vista de Uruapan en 1945.

FIGURA 4: Vista posterior de la capilla.

FIGURA 5:

FIGURA 6: Reconstrucción hipotética del núcleo prehispánico de la Huatápera.

FIGURA 7: Reconstrucción hipotética de la Huatápera, siglo XVI.

FIGURA 8: Capilla del Santo Sepulcro.

FIGURA 9: Cubierta plana de entablado.

FIGURA 10: Columnas de piedra braza.

FIGURA 11: Vista de la Huatápera.

FIGURA 12: Croquis de la ubicación de la Huatápera.

FIGURA 13: Croquis de la disposición del centro de la ciudad en 1937.

FIGURA 14: Vista lateral de la capilla del Santo Sepulcro.

FIGURA 15: Croquis de la cubierta Norte-Sur.

FIGURA 16: Croquis de la cubierta Poniente-Oriente.

FIGURA 17: Plano visto en planta y fachadas del edificio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Capítulo 2**

**FIGURAS 18 Y 19:** Desplazamiento de los continentes desde hace doscientos millones de años a la actualidad; arriba, estado inicial, abajo, estado actual.

**FIGURA 20:** Mapa de las placas tectónicas mayores.

**FIGURA 21:** Corte del globo terrestre que muestra los diferentes estratos que lo forman.

**FIGURA 22:** Subducción de la placa de Cocos y de Rivera.

**FIGURA 23:** Brecha sísmica de Michoacán.

**FIGURA 24:** Si la Tierra tuviera propiedades uniformes al transmitirse la energía sísmica en todas direcciones a partir del foco, las trayectorias seguirían líneas rectas y su velocidad sería constante. El otro esquema revela las capas concéntricas en que la Tierra está dividida.

**FIGURA 25:** Tipos de ondas sísmicas.

**FIGURA 26:** Movimientos de las ondas superficiales.

**FIGURA 27:** cinturón de Fuego del Pacífico o Cinturón Circunpacifico.

**FIGURA 28:** Sismicidad de México de 1800-1985.

**FIGURA 29:** Intensidad en la escala MM del sismo del 19 de junio de 1858.

**FIGURA 30:** Distribución de la población en México, 1821-1899.

**FIGURA 31:** Mapa de isosistas propuesto por J. Figueroa A. Para el sismo de Santa Juliana con base en el sismo de 1964, M=7.

**FIGURA 32:** Delimitación de la zona de réplicas A y E. Los segmentos achurados B, C y D muestran las regiones en donde ocurrieron la mayoría de las réplicas.

**FIGURA 33:** Localización del epicentro del sismo de 1985 y la réplica mayor.



### **Capítulo 3**

**FIGURA 34:** Fuentes sísmicas para sismos de subducción consideradas en el estudio de peligro sísmico realizado para la ciudad de Uruapan.

**FIGURA 35:** Fuentes sísmicas para sismos normales o tensionales.

**FIGURA 36:** Ubicación de la Falla de Acambay respecto a los demás mecanismos sismogénicos.

**FIGURA 37:** Localización de la Falla de Acambay.

**FIGURA 38:** Tasa de excedencia de aceleración para terreno firme, con un período de retorno de 100 años.

**FIGURA 39:** Osciladores, cada uno con un período natural diferente al vibrar, para ilustrar la forma en que se obtiene el espectro de respuesta.

**FIGURA 40:** Espectros de respuesta y envolvente para terreno duro Uruapan.

**FIGURA 41:** Espectros de respuesta y envolvente para terreno de transición Uruapan.

**FIGURA 42:** Espectros elásticos de pseudoaceleraciones para Uruapan (reducido por sobrerresistencia).

### **Capítulo 4**

**FIGURA 43:** Tipos de mampostería de piedras naturales.

**FIGURA 44:** Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero.

**FIGURA 45:** Variación de la adherencia respecto de la demora de asentado de la pieza superior.

**FIGURA 46:** Efecto de la succión de las piezas en la adherencia para diferentes proporcionamientos del mortero.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Figuras y cuadros

### Capítulo 5

FIGURA 47: Idealización de casas de adobe para análisis dinámico.

FIGURA 48: Planta típica de una casa de adobe.

FIGURA 49: Zonas críticas por flexión en el plano del muro.

FIGURA 50: Posibles mecanismos de agrietamiento del muro.

FIGURA 51: Masa equivalente para calcular el cortante con el método simplificado.

FIGURA 52: Franjas de ancho unitario que deben considerarse para determinar el peso por unidad de longitud al calcular el momento flexionante en la esquina.

### Capítulo 6:

FIGURA 53: Estado de esfuerzos planos en un elemento infinitesimal.

FIGURA 54: Estado de esfuerzos planos.

FIGURA 55: Estado de deformaciones planas.

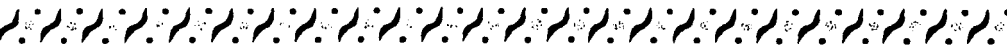
FIGURA 56: Discretización de una estructura en elementos triangulares de 3 nodos.

FIGURA 57: Funciones de forma del elemento triangular de tres nodos.

FIGURA 58: Discretización de elementos rectangulares de cuatro nodos en los ejes locales  $r$  y  $s$ .

FIGURA 59: Elemento rectangular de cuatro nodos sometido a un estado de flexión pura. a) Geometría inicial, b) Deformación del elemento, c) Deformación correcta de un segmento de viga de flexión.

FIGURA 80: Deformación del plano medio de una placa delgada y giro de la normal.





**FIGURA 61:** Teoría de placas de Reissner-Mindlin.

**FIGURA 62:** Discretización de una placa con elementos de placa de Reissner-Mindlin rectangulares de cuatro nodos.

## **Capítulo 7**

**FIGURA 63:** Malla de elementos finitos.

**FIGURA 64:** Modelado de la cubierta.

**FIGURA 65:** Apoyos articulados, con restricción de los desplazamientos.

**FIGURA 66:** Cargas inducidas a las vigas de madera por el peso propio de la cubierta.

**FIGURA 67:** Espectros de respuesta terreno de transición Uruapan.

**FIGURA 68:** Diagrama de contornos de esfuerzos flexionantes máximos.

**FIGURA 69:** Diagrama de contornos de esfuerzos flexionantes máximos.

**FIGURA 70:** Diagrama de contornos de esfuerzos cortantes máximos.

**FIGURA 71:** Vista en perspectiva de los contornos de esfuerzos cortantes.

**FIGURA 72:** Vista lateral de los contornos de esfuerzos cortantes.

**FIGURA 73:** Detalle de la vista de la página anterior.

**FIGURA 74:** Vista aérea de los esfuerzos cortantes.

**FIGURA 75:** Deformación del edificio.

**FIGURA 76:** Detalle de la estructuración del edificio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# **Relación de Cuadros**

## **Capítulo 2:**

**CUADRO 1: Escala de intensidades de Mercalli Modificada.**

**CUADRO 2: Temblores de gran magnitud.**

## **Capítulo 3:**

**CUADRO 3: Magnitud máxima generada por sismos de subducción.**

**CUADRO 4: Magnitud máxima generada por sismos normales o tensionales.**

**CUADRO 5: Aceleraciones máximas para sismos de subducción.**

**CUADRO 6: Aceleraciones máximas para sismos de fallamiento normal.**

**CUADRO 7: Tiempo transcurrido desde el último temblor característico.**

## **Capítulo 4:**

**CUADRO 8: Características de las piedras más comunes.**

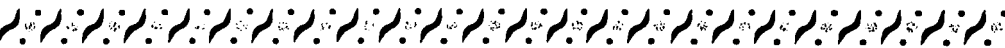
**CUADRO 9: Proporcionamientos de mortero.**

**CUADRO 10: Resistencia a compresión de la mampostería de piedras naturales.**

## **Capítulo 5:**

**CUADRO 11: Propiedades del adobe.**

**CUADRO 12: Coeficientes sísmicos recomendados para el análisis de casas de adobe en la República Mexicana.**



**Capítulo 7:**

**CUADRO 13: Esfuerzos cortantes críticos. Muro externo Norte-Sur.**

**CUADRO 14: Esfuerzos cortantes críticos. Muro externo Norte-Sur.**

**CUADRO 15: Esfuerzos cortantes críticos. Muro interior de la Capilla.**

**CUADRO 16: Esfuerzos cortantes críticos. Muro interno Norte-Sur.**

**CUADRO 17: Esfuerzos cortantes críticos. Muro interno Norte-Sur.**

**CUADRO 18: Esfuerzos cortantes críticos. Muro interno Norte-Sur.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**