

178.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**EFICIENCIA DE SISTEMAS DE REFUERZO  
DE VIVIENDA ECONOMICA SITUADA  
EN ZONAS SISMICAS**

**TESIS PROFESIONAL**

**INGENIERO CIVIL**

**EDUARDO VALENCIA RODRIGUEZ**

**México, D. F.**

**1981**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

EFICIENCIA DE SISTEMAS DE REFUERZO DE VIVIENDA  
ECONOMICA SITUADA EN ZONAS SISMICAS.

1.- INTRODUCCION Y OBJETIVOS.

2.- LA VIVIENDA DE BAJO COSTO Y SU COMPORTAMIENTO.

2.1. ASPECTOS GENERALES

- \* CONSTRUCCIONES DE ADOBE
- \* CONSTRUCCIONES DE PIEDRA
- \* CONSTRUCCIONES DE BAJAREQUE
- \* CONSTRUCCIONES DE TABIQUE O DE CONCRETO POBRE SIN REFUERZO

2.2. COMPORTAMIENTO SISMICO Y MODO DE FALLA

3.- PROCEDIMIENTOS DE REFUERZO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD ANTE SISMO.

3.1. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MAMPOSTERIA DE ADOBE

3.2. PROCEDIMIENTOS DE REFUERZO

3.2.1. CADENA DE CONCRETO

3.2.2. TIRANTES DE ACERO HORIZONTALES

3.2.3. MALLA DE ACERO

4.- PRUEBAS DINAMICAS EN MESA VIBRADORA.

4.1. MOVIMIENTOS SISMICOS APLICADOS EN LAS PRUEBAS

#### 4.2. RESUMEN DE LA PRIMERA ETAPA

4.2.1. PRIMER MODELO

4.2.2. SEGUNDO MODELO

4.2.3. TERCER MODELO

4.2.4. CUARTO MODELO

4.2.5. QUINTO MODELO

#### 4.3. DESCRIPCION DE LA SEGUNDA ETAPA DE ENSAYES

4.3.1. SEXTO MODELO.- VIVIENDA DE ADOBE CON MUROS INTERIORES

4.3.2. SEPTIMO MODELO.- VIVIENDA DE ADOBE REFORZADA CON TIRANTES  
DE ACERO

4.3.3. OCTAVO MODELO.- VIVIENDA DE TABICON

4.3.4. NOVENO MODELO.- VIVIENDA DE TABICON REFORZADA

#### 4.4. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

### 5.- RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA DE BAJO - COSTO EN ZONAS SISMICAS.

5.1. ANALISIS SISMICO

5.2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

REFERENCIAS

TABLAS

FIGURAS

## 1.- INTRODUCCION Y OBJETIVOS.

En las últimas décadas se han desarrollado en forma notable el conocimiento y la práctica sobre cómo proyectar y construir las estructuras para que sean capaces de resistir la acción de sismos intensos. Sin embargo, los estudios realizados y las normas existentes en los diferentes países se han concentrado mucho en el diseño de edificios de varios niveles con estructura de concreto reforzado o de acero. Por otra parte, las observaciones de los daños causados por terremotos recientes en diversos países de América Latina indican que el comportamiento de edificios urbanos ha sido en general satisfactorio, excepto en los casos en que existían errores de estructuración o de solución de detalles y conexiones y por daños frecuentes en los elementos no estructurales de la construcción.

La mayor parte de los daños materiales y pérdida de vidas humanas se han presentado por el colapso de viviendas, especialmente aquellas construidas sin la intervención de personal técnico calificado, sin apearse a las normas de construcción, con materiales locales de baja calidad y con mano de obra constituida por los propios habitantes de las viviendas.

Para citar sólo algunos ejemplos que ilustren la necesidad de estudiar a fondo el problema de la vivienda de bajo costo en zona sísmica, basta mencionar los terremotos del Perú en 1970, de Managua en 1972, de Puebla y Orizaba (México) en 1973 y de Guatemala en 1976, en donde los mayores estragos se registraron en viviendas como las mencionadas. Cabe destacar que en el terremoto de Guatemala de 1976, al producirse el colapso de 250,000 viviendas, la mayoría de adobe, murieron más de 25,000 personas.

lo que representó cerca del 98% del total de vidas humanas perdidas.

Se estima que en México cerca del 75% de las viviendas existentes son autoconstruidas con las modalidades enumeradas anteriormente. Aunque las características y el nivel de calidad de la vivienda económica varían mucho entre los diferentes países de América Latina, en todos existen construcciones con las características señaladas, en algunos de ellos en porcentajes aún mayores de los que se prese tan en México.

Esta modalidad de construcción es típica en el medio rural pero se presenta también en zonas urbanas aunque con características un tanto diferentes. Los procedimientos constructivos de la vivienda rural se han desarrollado para las distintas regiones o zonas como un fenómeno natural de experiencia acumulada que mediante un adecuado empleo de los recursos disponibles, ha conducido en la mayoría de los casos, a soluciones--estéticamente agradables, que a la vez que se ajustan a los patrones culturales de cada zona, suelen ser muy apropiadas para las condiciones climatológicas locales. Estas viviendas adolecen, sin embargo, de ciertas deficiencias higiénicas, resultado tanto de la escasez de ventilación e iluminación como de la inadecuada o inexistente delimitación de áreas para los distintos usos. A esto se añade la rapidez con que se deterioran los materiales y su comportamiento inadecuado ante fenómenos excepcionales como ciclones, inundaciones y terremotos.

En el medio suburbano tal situación suele agravarse porque los campesinos que inmigran a los núcleos de población sin recursos suficientes para proveerse de una vivienda adecuada, al no disponer de los materiales abundantes en el medio rural, en un malogrado intento de -

transferir sus costumbres y perpetuar sus tradiciones, recurren a soluciones híbridas como la de muros de tabique de mala calidad, unidos con mortero de todo, techos de lámina de cartón y muchas otras variantes. En tales condiciones, ni se preservan las cualidades de la vivienda rural típica, ni se superan sus deficiencias.

En México merece atención especial el problema de la seguridad contra sismo. Gran parte del país es sísmicamente activa. La fig 1 muestra una regionalización sísmica de la República; la zona identificada como D constituye una de las regiones de más alto riesgo sísmico del planeta, las zonas C y B, aunque de menor actividad sísmica, pueden estar sujetas a temblores que resulten destructivos para las viviendas rurales típicas.

Por las razones anteriores se considera que el problema de encontrar soluciones constructivas que aumenten la seguridad sin afectar sensiblemente el costo de la vivienda autoconstruida, debe tener la más alta prioridad en cuanto a las investigaciones en Ingeniería Estructural y tecnología de materiales de construcción.

El problema presenta dos aspectos básicos que demandan soluciones frecuentemente diferentes. El primero es el de las viviendas ya existentes en las diversas zonas sísmicas, cuya seguridad ante sismos es insuficiente y para las cuales se requiere proponer procedimientos de refuerzo que sean económicos, que no alteren drásticamente la fisonomía de la vivienda y que puedan ser ejecutados por los propios habitantes sin requerir gran cantidad de materiales industrializados. El segundo aspecto corresponde a la vivienda nueva para la cual puede pensarse en materiales y soluciones di



ferentes a las tradicionales, siempre que cumplan con las condiciones antes mencionadas.

Probablemente una de las razones por la que los especialistas en distintos aspectos de la vivienda han dedicado escasa atención a estos problemas consiste en la dificultad de que las soluciones y mejoras que el técnico pueda encontrar lleguen a ser implantadas en un medio en el que no existen canales apropiados para la transferencia de la tecnología. La dimensión del problema requiere de grandes esfuerzos de las instituciones pertinentes a las que atañe la responsabilidad de la divulgación, la educación y el apoyo económico necesario para que las soluciones más adecuadas puedan llevarse a cabo.

Este trabajo trata de presentar los problemas que en su comportamiento físico han tenido los tipos de construcción más comunes en la vivienda unifamiliar de bajo costo y de proponer medidas para mejorar su seguridad, basadas en sugerencias en la literatura sobre el tema y en la experiencia del autor adquirida durante su colaboración en el desarrollo de diferentes estudios experimentales sobre varios sistemas constructivos llevados a cabo en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. En las páginas siguientes se enfocará la atención a las construcciones de adobe por ser éstas las más comunes en América Latina.

## 2.- LA VIVIENDA DE BAJO COSTO Y SU COMPORTAMIENTO.

2.1.- ASPECTOS GENERALES.- La tipología de la vivienda de bajo costo es muy amplia y existen variaciones importantes de una a otra región. Desde el punto de vista de su resistencia a los efectos sísmicos, interesa fundamentalmente la disposición de los elementos verticales que tienen la función de tomar cargas laterales. En la gran mayoría de los tipos de vivienda, estos elementos consisten en muros de carga que sirven tanto de soporte para las fuerzas verticales transmitidas por el techo, como para dar rigidez y resistencia ante el efecto de las fuerzas laterales generadas durante un sismo.

Estas paredes son generalmente de mampostería formada por piezas prismáticas unidas con mortero. Las piezas pueden ser de producción industrializada, como los ladrillos de barro recocido de diferentes tipos y los tabiques o bloques de concreto, o pueden ser de materiales locales como la piedra, el adobe, etc. En otras modalidades comunes, las paredes están constituidas por paneles de madera o entramados de varas y cañas recubiertas con lodo. En todos los casos la respuesta ante sismo de construcciones a base de paredes de carga presenta algunas características que conviene destacar brevemente.

Los movimientos del suelo durante un sismo provocan vibraciones de la estructura en la cual se generan fuerzas de inercia que son proporcionales a la masa (peso) de las distintas partes de la construcción, y que tienen que ser resistidas y transmitidas a la cimentación y al suelo. Los elementos más adecuados para resistir esas cargas laterales son los muros que están alineados en la dirección del movimiento del terreno y

que tienen gran rigidez y resistencia en su plano. Para que estos elementos-- puedan cumplir su función, las fuerzas de inercia generadas en otras partes - de la construcción tienen que ser transmitidas hacia ellos. Condición para que esto se cumpla es que los techos (o entrepisos) actúen como una unidad rígida en su plano y transmitan sus fuerzas a los muros alineados en la dirección del movimiento y provoquen empujes mínimos normales a dicha dirección, en la cual los muros estarían sujetos prácticamente sólo a las fuerzas de inercia - generadas por su propia masa y actuarían como losas apoyadas en su perímetro. Otra condición para que la transmisión de carga se efectúe apropiadamente es que exista una conexión resistente entre el techo y los muros, y entre los muros y la cimentación, como se muestra en la fig 2.

De no cumplirse la condición de techo rígido en su plano, la situación se presentaría como se muestra en forma idealizada en la fig 3. Las fuerzas generadas en cada franja del techo se transmiten al muro frontal generando en él empujes normales a su plano, los cuales tienden a producir el volteamiento de dicho muro fig 4. De esta forma la mayor -- parte de las fuerzas de inercia son transmitidas a los elementos menos rígidos y aptos para resistirlas.

Cuando el techo es un diafragma rígido, la falla puede ocurrir por una insuficiente resistencia de las paredes para absorber fuerzas cortantes en su plano; dicha resistencia se vé muy afectada - cuando existen grandes aberturas para puertas y ventanas en dichos muros. Este tipo de falla se presenta a través de grietas diagonales como las que se - muestran en la fig 5. También pueden presentarse fallas debidas a una unión - defectuosa entre techo y muro como las que ocurrieron en las casas de Bello - Horizonte, en el terremoto de Managua de 1972, en el que en algunos cientos -

de casas idénticas, la losa de techo de concreto se desplazó y se cayó de los muros porque la unión entre los dos elementos era muy débil.

Cuando el techo no tiene rigidez en su plano, lo cual ocurre con mucha frecuencia, la falla se debe a la flexión en los muros más largos que provoca el agrietamiento de estos en las esquinas y su consecuente separación de los muros transversales; si la liga con el techo es pobre, una vez agrietados los muros en sus extremos, éstos quedan vibrando como paredes independientes y se propicia su falla por volteamiento. Este último ocurre generalmente hacia afuera, ayudado por los empujes del techo.

\*Construcciones de Adobe. - El adobe ha sido tradicionalmente el material más empleado para los muros de la vivienda rural, debido a la economía y facilidad de su fabricación y a sus excelentes características de aislamiento térmico. Actualmente, las condiciones socioeconómicas en los centros de población de la mayoría de los países de América Latina hace más conveniente el empleo de tabique de barro recocido o bloques de concreto. Por lo que las nuevas construcciones de adobe se limitan a pequeños poblados muy dispersos y poco comunicados.

Puede afirmarse que, aunque su empleo tiende a desaparecer, el adobe es el material del que está construido el mayor porcentaje de las viviendas existentes en el medio rural y que, por tanto, merece la mayor atención en cuanto al problema en estudio. Las viviendas más comunes de este material (ref 1) se caracterizan por un cuerpo principal de un solo piso, con planta rectangular de 30 a 50 m<sup>2</sup> de superficie, frecuentemente sin muros divisorios; los muros perimetrales, sin refuerzo alguno, tienen 3 o más metros de altura y espesores de 40 a 60 cm. Los sistemas de techo varían

según el clima de la región. La solución más común, propia de climas cálidos o templados, es a base de armaduras de madera con tejas de barro. En climas muy cálidos se coloca un tapanco de madera para tener un mejor aislamiento térmico. Los techos son generalmente de dos aguas con pendientes entre 25% y 50%, techos de un agua y de cuatro son menos frecuentes.

En regiones de climas más extremos y de escasa precipitación pluvial se emplea el "terrado", fig 6c, en que el techo está formado por vigas de madera separadas aproximadamente 50 cm. sobre las cuales se colocan tablas que soportan un relleno de tierra de 30 a 50 cm. de espesor. Los techos se cubren con una capa de mortero, generalmente de cal. Estos son de un agua con pendiente inferior al 10%.

La experiencia demuestra que el comportamiento sísmico de este material es definitivamente deficiente. La escasa resistencia a la tensión del adobe y la poca adherencia que se logra en las juntas con los morteros de lodo, son sólo algunos de los inconvenientes. Aún con adobes de buena calidad no puede lograrse una buena liga entre los muros transversales; esto, aunado a su gran peso propio y al peso del techo, hace que estos muros fallen casi siempre por el efecto de fuerzas normales a su plano, ya sea por volteamiento o por fallas locales por los empujes de los elementos de techo. En muchas ocasiones las fallas de estas construcciones han sido agravadas porque el adobe se encontraba muy debilitado por efecto del intemperismo.

\*Construcciones de Piedra.- Con frecuencia las paredes de las viviendas son de mampostería de piedra natural (boleos y piedras no escuadradas) unida con morteros muy pobres de cal o lodo. La calidad

de la construcción es generalmente muy baja; los muros están fuera de plomo y el mortero no llena totalmente las juntas. Este tipo de muros está asociado - con frecuencia a techos pesados de terrado y las características de la vivienda son similares a las de adobe.

El comportamiento sísmico de las construcciones con muros de piedra natural es similar al de las de adobe, con los agravantes de que el peso volumétrico de la piedra es mayor y la resistencia de la mampostería a la tensión y al cortante es generalmente menor, por la mala calidad del mortero con que se unen las piedras y porque éstas presentan cantos redondeados que no permiten una adherencia adecuada con el cementante. Además de los modos de falla principales descritos para las construcciones de adobe, es frecuente que se presente una falla local por el empuje de las vigas de techo sobre el muro, lo que da lugar a una perforación puntual del muro y a la caída parcial del techo, fig 7.

\*Construcciones de Bajareque.- Estas construcciones constan de una armazón de madera rolliza en donde los elementos -- verticales (horcones) se hincan directamente en el suelo y en su parte superior se ligan con elementos horizontales perimetrales sobre los cuales descansa el techo, fig 8a. Las paredes se forman con un entramado de varas o caña - el cual se recubre con lodo, fig 8b. Se obtiene una construcción muy ligera - y económica, típica de las regiones de clima cálido-húmedo. El techo, de dos o cuatro aguas, es generalmente de palmera (palapa).

Las construcciones de bajareque por ser ligeras y flexibles soportan sismos adecuadamente cuando se encuentran en buen estado. Han ocurrido sin embargo, daños importantes, y algunos colapsos, por

el deterioro de la madera debido a la humedad y al ataque de insectos, especialmente por la putrefacción de la parte de los horcones que se encuentran hincados en la tierra. La liga defectuosa de los horcones y los larqueros ha sido también causa de daños. El comportamiento sísmico de este tipo de construcción puede equiparse con el denominado "marco de madera con relleno".

\*Construcciones de Tabique o de Concreto -

Pobre sin Refuerzo.- Actualmente los materiales que más se emplean en los muros de viviendas rurales son los ladrillos de barro recocido y los bloques de concreto, fabricados localmente en forma artesanal. La calidad de estos materiales es muy variable según los suelos y los procedimientos de fabricación -- que se usen, pero casi siempre es bastante pobre. Los morteros con que se unen son también, por lo general de baja calidad y con frecuencia son de cal y arena únicamente. En las regiones de mayor riesgo sísmico o en sitios donde el suelo sea muy deformable, es frecuente que se coloquen elementos de refuerzo (castillos y dalas) en los muros.

Las construcciones de estos materiales son usualmente de dimensiones menores que las de adobe, especialmente en lo que se refiere a la altura de los muros. Los techos son del mismo tipo de los descritos para casas de adobe; excepcionalmente son de losa de concreto o de lámina de asbesto.

En viviendas de un piso de mampostería de tabique recocido se ha observado durante sismos intensos un comportamiento muy inadecuado, pero no tan desfavorable como el de las casas de adobe. El número de colapsos ha sido más reducido, aunque, se han presentado agrietamientos y fallas locales especialmente cuando el mortero empleado no era de buena

calidad o cuando el número y tamaño de los huecos era grande. La diferencia - en comportamiento con respecto a las viviendas de adobe se debe principalmente al menor peso y altura de estas construcciones y, en parte, a la mejor calidad del material.

El comportamiento defectuoso ante sismos - intensos es debido principalmente a que no se logra una liga adecuada de los muros entre sí y con el techo, y a que el tipo de falla es muy frágil, ya que no cuenta con refuerzo que mantenga la capacidad de carga una vez que se han agrietado los muros.

Una fuente muy frecuente de daños y colapsos es la presencia de huecos de puertas y ventanas no reforzados, en los que la concentración de esfuerzos que se presentan en las esquinas provoca la iniciación de grietas diagonales que llevan a la falla de todo el muro. Este tipo de construcción debe evitarse en zonas sísmicas, exceptuando quizás construcciones que encierren espacios pequeños y con techos ligeros.

2.2.- COMPORTAMIENTO SISMICO Y MODO DE FALLA.- Las casas de adobe como las descritas anteriormente se caracterizan por la escasa densidad de muros, por la apreciable altura y longitud sin refuerzo de los mismos y por la mínima restricción que el techo proporciona a los extremos superiores de los muros, etc., todo ésto hace que el comportamiento es té regido por la flexión de los muros en dirección normal a su plano. Las --- fuerzas sísmicas generan vibraciones en los muros, las cuales inducen momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los mismos, haciendo que éstas se agrieten progresivamente hacia abajo, de manera que el muro frontal comienza a vibrar como un voladizo, ocurriendo el volteamiento cuando la altu



ra agrietada del muro es suficiente para que la resultante de fuerzas caiga fuera de la sección del muro. El colapso del muro ocurre casi siempre hacia afuera, ayudado por el coceo del techo. Este modo de falla es el que se ha observado con mayor frecuencia a raíz de temblores.

En viviendas en donde la longitud libre de muros (longitud entre muros transversales) es pequeña o donde los techos proporcionan restricción a la flexión (como en las viviendas de más de un piso), la falla suele ocurrir por cortante a través de grietas diagonales. Este modo de falla es propiciado frecuentemente por la existencia de aberturas importantes en los muros.

Se han observado indicios (ref 2) de que el colapso se ha iniciado en ocasiones por la caída del techo, ya sea por fallas locales en las conexiones o en la madera misma por encontrarse muy deteriorada, o por deslizamientos de los elementos del techo sobre los muros a los que están fijados en forma muy precaria.

Una falla parcial, que ocurre con frecuencia, aún para sismos de moderada intensidad, se debe a que las tejas se deslizan por efectos de las aceleraciones verticales y horizontales y caen a veces dentro de la misma vivienda.

### 3.- PROCEDIMIENTOS DE REFUERZO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD ANTE SISMO.

3.1.- PROPIEDADES MECANICAS DE LA MAMPOSTERIA DE ADOBE.- Como se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo, la atención se enfocará en las viviendas rurales de adobe por ser estas mayoritarias en la República Mexicana. Por tal motivo, el Instituto de Ingeniería ha llevado a cabo diversos estudios experimentales para determinar, entre otros- aspectos, las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe que más influencia tienen en el comportamiento sísmico de una construcción del tipo de las - descritas en páginas anteriores. Por otro lado, es conveniente recalcar que - los resultados obtenidos en dicho estudio son fácilmente extrapolables a las - construcciones de mampostería de piedra natural y de ladrillo sin refuerzo, - gracias a la similitud existente en su estructuración.

En la ref 3 se analizaron las propiedades- de los adobes y la mampostería de adobe (adobes unidos con mortero).

Con el fin de lograr resultados que fueran representativos de la realidad, al menos en nuestro país, se realizó un muestreo de adobes de las diferentes regiones de mayor riesgo sísmico; de dichas- muestras se obtuvieron especímenes de diferentes medidas y se realizaron ensayes de compresión y de tensión por flexión. La Tabla 1 muestra los resultados de dichos ensayos; en ellos se observa que el intervalo de variación de las - propiedades es amplio y que los valores promedio para la resistencia en com-presión y en tensión son de 10 y 3 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. La literatura exis-tente sobre el tema consigna valores para adobes de diversas zonas que caen - dentro del intervalo encontrado en el estudio mencionado.

Con el objeto de estudiar las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe, se fabricaron adobes en el laboratorio, buscando que tuvieran propiedades similares a las encontradas en las muestras ya mencionadas. Después de algunos tanteos se eligió un tipo de suelo con el que se obtenían de manera consistente, resistencias de 15 y 3.2Kg/cm<sup>2</sup> a compresión y a tensión por flexión respectivamente. No obstante que la resistencia a compresión de las piezas fabricadas en laboratorio fue superior a la de los adobes muestreados, se consideró que la propiedad más importante para los experimentos era la resistencia en tensión por flexión, por lo que se aceptaron los adobes de laboratorio. Otra característica importante de reproducir fue la contracción de las piezas al perder el agua por evaporación, ésto se logró dosificando la cantidad de paja en la mezcla.

Una vez resuelta la fabricación de los adobes, se construyeron muretes en los que se realizaron ensayos de compresión, cortante y flexión siguiendo las modalidades típicas para los estudios de mamposterías, Tabla 2. En esta fase se utilizaron adobes de dos tamaños, el grande de 10 x 40 x 60 cm. y el pequeño de 4 x 10 x 24 cm. Como se observaron resultados muy similares para los dos tamaños, se decidió utilizar exclusivamente adobes pequeños para las pruebas posteriores.

Los resultados arrojados por el estudio mostraron lo siguiente:

- a).- El tipo de mortero que se utilice en las juntas tiene muy poca influencia en la resistencia a compresión de los muretes, la cual es solo ligeramente inferior a la resistencia a compresión de los adobes aislados.

- b).- La relación esfuerzo - deformación es aproximadamente lineal y el módulo de elasticidad, que en muros unidos con lodo es del orden de 2500 - Kg/cm<sup>2</sup>, crece significativamente si se emplean morteros de cemento.
- c).- El tipo de junta tiene una influencia decisiva en la resistencia a cortante de la mampostería de adobe; siendo esta máxima cuando se emplea mortero de cemento y por el contrario, viéndose reducida drásticamente para juntas de lodo y siendo menor aún para mortero de cal.
- d).- La resistencia en tensión debida a flexión de los muretes de adobe resultó ser ligeramente inferior a la obtenida para los adobes aislados.

Los resultados tienden a indicar que las propiedades de un muro de adobe junteado con lodo (que es lo más común en las viviendas rurales), son semejantes a las de los adobes solos y que no existe reducción importante por efecto de las juntas, lo cual indica que al juntar los adobes con el mismo lodo con que éstos fueron fabricados se obtiene prácticamente un muro monolítico.

Las propiedades anteriores fueron obtenidas en especímenes que no habían sufrido deterioro por intemperización, sin embargo, se considera que la resistencia en tensión por flexión y en cortante pueden verse reducidas de manera significativa por los agrietamientos sufridos por los adobes debido a las variaciones de humedad. En la fig 9 se muestran los resultados de ensayos en compresión y en tensión por flexión de adobes en los que se varió el contenido de humedad; se aprecia cómo ambas resistencias disminuyen casi linealmente con la humedad, hasta ser práctica--

mente nulas para contenidos de humedad del orden de 12%. Lo anterior implica que si el muro de adobe absorbe agua del suelo por capilaridad, su resistencia se verá reducida.

Al recomendar valores de diseño para las diferentes propiedades, hay que tomar en cuenta la variabilidad proveniente de las diferencias en los tipos de suelos y en los procedimientos de fabricación empleados. Un criterio propuesto (ref 4) para tomar en cuenta esta variabilidad es el de adoptar como valor de diseño el que tiene una probabilidad de 2% de no ser alcanzado y determinarlo en forma aproximada, a partir de la información estadística disponible, con la expresión:

$$X^* = \frac{m_x}{1 + 2.5 c_x}$$

en que  $X^*$  es el valor de diseño de la propiedad en cuestión,  $m_x$  la media de los datos y  $c_x$  su coeficiente de variación. Con dicho criterio se obtienen los valores siguientes para las resistencias de la mampostería de adobe.

Resistencia en compresión	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia en tensión por flexión	2 "
Resistencia en cortante	0.8 "

Las resistencias anteriores son valores a la falla y no esfuerzos admisibles. Para obtener estos últimos, debe aplicarse un factor de seguridad que, de manera semejante a lo propuesto para mampostería (ref 4) se sugiere sea de 2.5. No se ha tomado en cuenta en los valores propuestos la reducción en resistencia que puede presentarse por efectos de humedad. Cuando la ubicación de la vivienda, el tipo de suelo -

y la cimentación sean tales que el adobe pueda quedar humedecido por un lapso apreciable por la absorción de agua del subsuelo, las resistencias deben reducirse al menos a la mitad. En las construcciones de nuevas viviendas deben evitarse con extremo cuidado las situaciones que puedan dar lugar a dicha absorción de agua.

Para el módulo de elasticidad y el de rigidez al cortante pueden considerarse los valores obtenidos de los ensayos, o sea 2500 y 750 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.

3.2.- PROCEDIMIENTOS DE REFUERZO.- Las soluciones que se han propuesto para reparar o reforzar las viviendas de adobe, de cal y canto o de tabique son similares debido a que el comportamiento y modos de falla son semejantes para los diferentes materiales.

3.2.1.- CADENA DE CONCRETO.- El requisito mínimo de refuerzo que se recomienda es la colocación de un elemento perimetral en el extremo superior de los muros, con el fin de proporcionar continuidad entre los muros transversales, aumentar la resistencia a flexión y la rigidez y permitir una mejor liga con el techo. A este requisito va generalmente aunada alguna recomendación para rigidizar el techo en su plano.

Una solución de este tipo ha sido propuesta por técnicos de la Ex-Secretaría de Obras Públicas a raíz de los temblores de Chiapa de Corzo en (ref 5), en la cual se sugieren los detalles constructivos que permiten lograr una liga adecuada de una viga perimetral de concreto con el muro de adobe y con el techo; la solución se muestra esquemáticamente en la fig 10.

En otra solución del mismo tipo, el refuerzo consiste en una viga de madera de alma abierta (en forma de escalera) embebida en el adobe, a la cual se conecta el techo. Dicha solución se esquematiza en la fig 11.

### 3.2.2.- TIRANTES DE ACERO HORIZONTALES.--

La liga de los muros por medio de tensores de acero fue propuesta originalmente por Ambreseys. La solución se muestra en la fig 12 y va asociada a la inyección de las juntas entre las piedras con un mortero con consistencia de lechada, el cual da mayor integridad y resistencia a los muros.

Procedimientos que buscan una mejoría más radical del comportamiento, consisten en colocar elementos de concreto verticales en las esquinas y en las aberturas, los cuales junto con la viga cadena, forman marcos que confinan el adobe, fig 13. Debido a las dimensiones de los muros, estos elementos de concreto resultan muy robustos y hacen que la solución resulte complicada y costosa. Otras modalidades de refuerzo consisten en la colocación de elementos verticales de madera dentro del adobe o adosados a los muros y ligados al techo.

### 3.2.3.- MALLA DE ACERO.- Un procedimiento que tiende a lograr refuerzo, rigidización y liga de los muros, así como su protección de la intemperie es el que se ha propuesto en la ref 6 y que se muestra en la fig 14. Consiste en colocar un recubrimiento de mortero de cemento sobre una malla de acero de refuerzo fijada cuidadosamente al muro por ambas caras, formando un elemento compuesto de adobe y concreto reforzado.

Otra forma de mejorar la seguridad de las

construcciones existentes es a través de modificaciones que reduzcan la magnitud de las fuerzas que las afectarían en caso de un sismo; por ejemplo, - la reducción del peso del techo a través del empleo de materiales más ligeros; la reducción de la altura de los muros dentro de límites que no afecten la habitabilidad y la adición de muros intermedios que rigidicen la construcción, son soluciones que pueden mejorar la resistencia.

Al juzgar los distintos procedimientos - de refuerzo hay que considerar la eficiencia en aumentar la seguridad contra sismo, la facilidad de ejecución en una vivienda ya terminada y el costo en cuanto a materiales de construcción.

En lo que respecta a las construcciones - de bajareque las recomendaciones para incrementar la seguridad se dirigen - esencialmente a evitar el deterioro de los materiales ya que, como se ha dicho, el comportamiento sísmico de estas construcciones es excelente cuando los materiales no están intemperizados.



#### 4.- PRUEBAS DINAMICAS EN MESA VIBRADORA.

Las características peculiares de la construcción de adobe dificultan el estudio del comportamiento ante cargas laterales por medio de ensayos sencillos, principalmente por la dificultad de aplicar cargas a los especímenes sin que se produzcan fallas locales en los puntos en los que se concentren las cargas. Un ensayo sencillo y representativo consiste en colocar el modelo en una plataforma cuya inclinación puede variarse gradualmente (ref 7). Una manera más elaborada es a través de ensayos en mesa vibradora.

En el Instituto de Ingeniería se cuenta con una mesa vibradora de 2.4 x 4.5 metros con capacidad para recibir modelos hasta de 15 toneladas y aplicar movimientos en la dirección larga de la mesa que reproducen con fidelidad acelerogramas medidos o simulados. El desplazamiento máximo de la mesa es de  $\pm 2.5$  cm.

De acuerdo con la descripción proporcionada en páginas anteriores puede considerarse como vivienda típica de adobe en el medio rural la que se muestra en la fig 15. La longitud y altura de los muros hace que sea crítico el efecto del sismo en dirección normal a ellos y que la falla esperada sea por efectos de flexión.

Para ensayar la vivienda en cuestión en mesa vibradora, el tamaño de la mesa obliga a reproducir sólo una porción de la vivienda o a ensayar un modelo a escala reducida. Se eligió esta segunda opción y se construyó un modelo con una escala geométrica de 1:2.5. Para reproducir el comportamiento dinámico del prototipo se requiere respetar en el

modelo una serie de condiciones impuestas por el análisis dimensional, los que se describen con detalle en la ref 8.

**4.1.- MOVIMIENTOS SISMICOS APLICADOS EN-LAS PRUEBAS.**- Los ensayos consistieron en sujetar la base de los modelos a la mesa vibratoria y someter ésta a movimientos similares a los ocurridos durante temblores representativos.

El equipo de control de la mesa permite múltiples opciones para generar el movimiento; en el caso particular de simulación de un temblor, la información requerida se puede proporcionar con datos de aceleraciones, velocidades o desplazamientos. Es posible además, - escalar las amplitudes con factores prefijados para simular diferentes intensidades.

Dada la versatilidad del equipo, se decidió realizar los ensayos de esa primera etapa alimentando la consola de operación con las historias de desplazamientos correspondientes a los registros obtenidos de tres temblores importantes.

Los acelerogramas seleccionados tienen la característica común de presentar ordenadas espectrales altas para periodos pequeños, o sea, los tipos de movimientos que causan efectos más graves en las estructuras en estudio. Se eligió la componente N-S del temblor de El Centro por ser el más comunmente empleado en estudios de este tipo y por permitir comparaciones con los resultados de ensayos de otras estructuras; - se empleó además un acelerograma del sismo de Managua por ser un movimiento que provocó muchos daños en construcciones similares a las aquí estudiadas;

finalmente se escogió un registro obtenido en Oaxaca del sismo de Puebla y-Orizaba por dar lugar a aceleraciones muy altas con pequeños desplazamientos del terreno. Los valores máximos de aceleración y desplazamiento de los acelerogramas empleados se consignan en la Tabla 3.

Los requisitos del análisis dimensional- (ref 8), implicaron que en los acelerogramas los tiempos se dividieran entre la escala geométrica y las aceleraciones se multiplicaran simultáneamente por el mismo factor (2.5).

4.2.- RESUMEN DE LA PRIMERA ETAPA.- Los modelos se fabricaron con adobes similares a los empleados para la determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe; éstos tenían una resistencia promedio de 15 Kg/cm<sup>2</sup> en compresión y 3 Kg/cm<sup>2</sup> en tensión - por flexión y dimensiones de 4 x 16 x 24 cm. (las de un adobe de dimensiones típicas reducido 2.5 veces).

Todos los modelos reproducían un mismo - tipo de vivienda, fig 15, variando el tipo de techo y refuerzo. Se dejaron huecos para puertas y ventanas con dinteles de madera. Solo en los primeros ensayos se colocó un techo propiamente dicho que reproducía a escala el mostrado en la fig 6b, a base de elementos de madera y tejas. En las pruebas - subsiguientes sólo se colocaron las masas correspondientes al techo apoyadas sobre canales de acero descansando libremente sobre los muros largos, dando lugar a una situación algo más desfavorable que la real, ya que no proporcionaba prácticamente ninguna restricción al movimiento de los muros en dirección normal a su plano. Los pesos colocados representaban en algunos casos un techo "ligero" (teja sobre madera) y en otros, un techo "pesado" re-

representativo de un terrado (500 Kg/m<sup>2</sup>).

Las pruebas se realizaron colocando los modelos sobre la mesa, de manera que el movimiento de ésta fuera perpendicular a los muros largos, produciendo la condición más desfavorable para la falla por flexión de los mismos. Solamente el modelo 5 se ensayó también en dirección normal a la descrita.

Con la finalidad de contar con una base de comparación entre los resultados de los diversos modelos se decidió establecer un criterio único de evaluación. En él se establece que si el período se incrementa menos de 10% y el aumento del amortiguamiento no rebasa el 20% respecto a los valores iniciales, la estructura se puede considerar aún en buen estado. Por otro lado, si los incrementos en el período y en el amortiguamiento rebasan el 50% se considera que la estructura ha fallado para fines prácticos de este estudio.

En esta primera etapa se estudiaron cinco modelos(ref 9) de los cuales tres fueron construidos en forma independiente, dos sin refuerzo y uno con cadena de concreto; los modelos restantes se obtuvieron reforzando dos previamente ensayados sin refuerzo alguno y que habían sido llevados a un estado de daño muy avanzado; uno se reforzó con malla y el otro con tirantes horizontales de acero.

El procedimiento de ensaye consistió en someter cada modelo a movimientos que representaban el sismo elegido convenientemente escalado. La amplitud de los cuales se aumentaba progresivamente hasta obtener el estado de daño considerado como de falla. Antes de cada ---

prueba se realizaba un ensaye de vibración libre en el que una de las paredes largas se sometía a una fuerza horizontal en el centro de su extremo superior fig 16, y se soltaba bruscamente registrando la variación de las aceleraciones en los distintos puntos instrumentados. De dichas mediciones se calculaban el período natural de vibración y el amortiguamiento. Estos parámetros se consideran como un índice cuantitativo del nivel de daño sufrido por el espécimen.

En cada modelo se colocaron seis acelerómetros con la ubicación mostrada en la fig 17. El colocado en la base, paralelo a la dirección del movimiento, tenía como fin comprobar que las aceleraciones impuestas a la mesa fueran las deseadas; en algunos ensayos se instaló otro acelerómetro en la base en la dirección normal al movimiento, para verificar que no hubiera movimientos transversales significativos. Los acelerómetros en las paredes permitían determinar la variación de las aceleraciones con la altura del muro y con la distancia a las esquinas, así como verificar si las distintas paredes vibraban en fase o no.

4.2.1.- PRIMER MODELO.- Sólo se empleó - en este modelo el movimiento representativo del sismo de El Centro. El ensaye se dividió en tres etapas; la primera, en la cual el modelo contaba con un techo "ligero" de teja y durante la cual aparecieron las primeras grietas por flexión en los muros largos al aplicarse el movimiento correspondiente al 50% de la intensidad máxima, (aceleración máxima del terreno de 0.16 g - en el prototipo). El daño no fue muy espectacular, pero fue evidente desde el punto de vista instrumental; después de este ensaye se observó un incremento apreciable del período de vibración y del amortiguamiento, además los dos muros largos comenzaron a vibrar de manera independiente. Posteriormente

se aplicaron niveles hasta 90% de la intensidad total del sismo considerado. El daño fue muy severo a partir del 70%, pero no se presentó el colapso total del modelo. En la segunda etapa se quitó el techo y la masa adicional - que se había colocado para cumplir con los requisitos del análisis dimensional y se colocó la masa correspondiente al techo directamente sobre los muros. Se observó, para la intensidad máxima del sismo, una dislocación grave del modelo pero tampoco ocurrió el colapso. Finalmente en la última etapa -- del ensaye, se incrementó la masa sobre los muros hasta representar un techo de 500 Kg/m<sup>2</sup> y se sometió nuevamente al mismo movimiento y aunque no se provocó el colapso total, el daño fue progresivamente más espectacular y el estado final del modelo bien podría calificarse como desastroso. Se considera que, para 50% de la intensidad del sismo de El Centro, el daño en el modelo fue suficientemente severo para considerar que este había fallado. El período natural y el coeficiente de amortiguamiento medidos en el modelo antes de que se sometiera a efectos sísmicos se consignan en la Tabla 4.

4.2.2.- SEGUNDO MODELO.- Construido con - el mismo tipo de material y geometría que el modelo 1, con la única diferencia de contar con una cadena de concreto perimetral según el procedimiento - de refuerzo recomendado en páginas anteriores. Los ensayos iniciales de vibración libre mostraron que el período fundamental era inferior en 16% al determinado en el modelo no reforzado; esto indica que la cadena proporcionó un - incremento de rigidez de aproximadamente 40%.

Este modelo se sometió al mismo movimiento sísmico y secuencia que el modelo no reforzado. Se llegó progresivamente a la intensidad máxima sin que hubiera daños visibles; el período no varió y el amortiguamiento aumentó un poco, lo cual denota que hubo solo pequeños da

ños en el modelo. Posteriormente, se sustituyó el techo de teja por masas equivalentes sobre los muros simulando un techo pesado (500 Kg/m<sup>2</sup>) y se ensayó nuevamente, no habiendo diferencia alguna en el comportamiento del modelo respecto a la prueba anterior.

Una vez resanadas las grietas y con el mismo techo pesado se sometió el modelo a la intensidad máxima del sismo de Managua, con lo cual se provocó daño ligero en los muros cabeceros en los que aparecieron pequeñas grietas de cortante. Finalmente se sometió al movimiento del temblor de Oaxaca con intensidades progresivas desde 90% hasta 360%. A partir de intensidades mayores a dos veces la del sismo real, el daño fué apareciendo progresivamente hasta que las grietas por cortante se prolongaron de extremo a extremo en los muros cabeceros. En los muros largos la configuración de grietas fué similar a la del primer modelo, con la agravante de que las grietas verticales en la intersección de los muros se extendieron casi hasta la base sin seguir por las juntas sino atravesando las piezas.

El sistema de refuerzo empleado en este modelo resultó eficiente hasta una intensidad de casi tres veces la del sismo de Oaxaca, a pesar de un nivel de daño bastante considerable, los muros vibraban en fase. Cuando el modelo se sometió a una excitación equivalente al triple de la intensidad del sismo real, aparecieron grietas horizontales en los muros cabeceros, a la altura de la base de los espolones y con esto se perdió la continuidad que la cadena proporcionaba, vibrando cada muro con periodos diferentes.

4.2.3.- TERCER MODELO.- El objetivo particular de los ensayos de este modelo fué calibrar el sistema de refuerzo que

Los autores propusieron para reparar los daños producidos en muchas casas de adobe en Chiapa de Corzo, Chiapas, ocasionados por los sismos de 1975. Por tal motivo se aprovechó el primer modelo, que se había llevado a un estado de daño avanzado, para repararlo rellenando las grietas con lodo en primer lugar y reforzarlo con una malla de acero y aplanado de mortero; se coló así mismo una pequeña cadena perimetral de concreto en la parte superior de los muros de solo la mitad de la altura de la empleada en el modelo 2, o sea 3 cm., y sin los espolones ni la costilla en la cara en contacto con los adobes ya que en este caso la liga entre adobes y cadena se logró mediante la malla.

El período natural del modelo al inicio del ensaye fue superior al del modelo 1 en 40%, poniendo de manifiesto la imposibilidad de restituir la rigidez original. Sin embargo, tal incremento del período condujo a condiciones menos críticas pues el modelo salió de la zona de ordenadas espectrales altas, al tiempo que la respuesta dinámica del modelo se redujo también a causa del mayor amortiguamiento. Por otro lado, se comprobó que el refuerzo proporcionó un considerable grado de ductibilidad del que carecía la estructura original, convirtiéndose éste último, en la ventaja más importante del sistema de reparación empleado.

Para su ensaye se colocó inicialmente una masa equivalente a techo ligero, y, al someter el modelo al movimiento representativo del sismo de El Centro, el período fue aumentando hasta alcanzar un incremento en 20%; sin embargo no hubo daños aparentes y todos los puntos instrumentados vibraron en fase.

El incremento de la masa hasta representar un techo pesado no provocó ninguna alteración adicional; luego de excitar



el modelo a la máxima intensidad posible con los temblores de El Centro y Managua, el período y el amortiguamiento registrados con las pruebas de vibración libre mantenían consistentemente un mismo valor.

Con el movimiento representativo del sismo registrado en Oaxaca se sometió el modelo a una intensidad de aproximadamente 450% del original; el resultado fue que el modelo se dañó en forma muy severa ya que en todos los muros aparecieron grietas diagonales y en algunas partes se empezó a desmoronar el aplanado, la aceleración en la base rebasó el doble del valor de la gravedad y sin embargo, el sistema de refuerzo empleado fué capaz de mantener la continuidad y en la prueba de vibración libre posterior, todos los acelerómetros registraron el mismo período.

Posteriormente fue posible someterlo de nueva cuenta a la acción del sismo con intensidad gradual desde 20% hasta 450% de la correspondiente a la real y a pesar de incrementos de 30% y 70% en el período y amortiguamiento respectivamente, el modelo seguía respondiendo como un continuo, vibrando con un solo período.

4.2.4.- CUARTO MODELO.- El objetivo de este modelo fue doble, primero detectar los efectos del sismo registrado en Oaxaca en una casa de adobe no reforzada y segundo, disponer de un modelo dañado para calibrar otro sistema de reparación y refuerzo. El modelo se ensayó con masas equivalentes a la de un techo pesado.

Siguiendo el procedimiento de ensaye utilizado anteriormente, se indujo varias veces a la base del modelo el movimiento citado, incrementando la intensidad desde 20% hasta 135% de la del sismo-

real; ésto fue suficiente para provocar un nivel de daño en apariencia similar al ocasionado al modelo 1 por el temblor de El Centro, con la única diferencia de que las grietas verticales por flexión, en la intersección de los muros, se presentaron en los cabeceros y no en los largos; sin embargo, instrumentalmente se detectó que la situación final en este modelo fue más crítica, pues el periodo aumentó hasta casi tres veces el valor inicial, y el amortiguamiento prácticamente se duplicó.

4.2.5.- QUINTO MODELO.- Como se explicó en párrafos anteriores, este modelo surgió de la reparación y refuerzo del modelo 4. Este se reparó ligeramente mediante el rajueo de las grietas utilizando lodo similar al empleado durante su construcción, el sistema de refuerzo que se estudió en este modelo consistió en "amarrar" los muros mediante dos tirantes horizontales, uno por dentro y otro por fuera, alojados dentro del muro a paño con las caras, a 10 cm (25 cm en el prototipo) del extremo superior fig 18. Los tirantes empleados en el modelo fueron varillas corrugadas de 5/16 de pulg. ( $A_s = 0.49 \text{ cm}^2$ ), que equivalen a barras de 1/2 pulg. ( $A_s = 1.27 \text{ cm}^2$ ) en el prototipo, y se atornillaron en los extremos ligándose a las del muro perpendicular mediante placas de madera; las tuercas se apretaron a tope dejando los tirantes ligeramente postensados.

Como era de esperarse, el periodo inicial fue superior al del modelo 4, lo mismo que el amortiguamiento, pero a diferencia de aquél, el incremento en el periodo fue sólo de 30% y en el amortiguamiento del 140%, a pesar de que la intensidad de la prueba más severa a que se sometió fue casi tres veces la del sismo original.

Los tirantes cumplieron su función de li-

gar los muros ya que aún cuando para niveles bajos de excitación se reabrieron las grietas de flexión que habfan provocado que los muros vibraran independientemente en el ensaye del modelo 4, en el modelo reforzado se advertía un mismo periodo para una intensidad igual a la que causó en el modelo sin - refuerzo un estado de daño que se consideró equivalente a la falla del proto tipo. La intensidad máxima a que se sometió fue equivalente a 270% del sismo real aunque a partir de un nivel de intensidad de 150% de la original se detectó que los muros vibraban con periodos diferentes.

Se giró luego el modelo sobre la mesa de forma tal que la excitación actuara en dirección paralela a los muros largos. El periodo fundamental en esta dirección fue 0.035 seg., bastante menor que en la otra, debido a que los muros que trabajan a flexión eran más cortos y no tenían hueco alguno. El ensaye se realizó con la misma secuencia que en la otra dirección, pero el nivel de daño fue mucho mayor a juzgar por el periodo, que después de la intensidad máxima (2.25 veces el temblor de Oaxaca) fue cuatro veces más grande que el original. Esto ocurrió en parte porque el modelo ya estaba dañado, y en parte porque los muros largos, que con la nueva orientación del modelo quedaron sometidos a esfuerzos cortantes, tenían zonas débiles a causa de los huecos.

**4.3.- DESCRIPCION DE LA SEGUNDA ETAPA DE- ENSAYES.** - La segunda etapa de pruebas en mesa vibradora comprendió el ensaye de cuatro modelos, de los cuales dos fueron construidos independientemente y los dos restantes fueron el resultado de la reparación y refuerzo de aquellos. Dos modelos se construyeron con adobes de características enteramente similares a los empleados en la primera etapa, mientras que para la construcción - de los dos últimos, se emplearon tabicones de cemento-arena en proporción --

1:10 con una resistencia de 42 Kg/cm<sup>2</sup> y de 15 Kg/cm<sup>2</sup> a la compresión y a la tensión por flexión respectivamente. Las propiedades mecánicas de la mampostería de cemento-arena se consignan en la Tabla 5.

Durante los ensayos de esta segunda etapa sólo se utilizó el registro correspondiente al temblor registrado en Oaxaca ya que la limitación de la mesa vibratoria, en lo que respecta a su desplazamiento permitía aplicar una aceleración máxima convenientemente escalada del orden del 90% de la del sismo de El Centro, mientras que con el sismo de Oaxaca la intensidad correspondiente sería equivalente a un sismo que provocaría aceleraciones nueve veces más fuertes que el real.

**4.3.1.- SEXTO MODELO.- VIVIENDA DE ADOBE-  
CON MUROS INTERIORES.**- Como se mencionó en un párrafo anterior, este modelo se fabricó con adobes escala 1:2.5 reproduciendo el mismo tipo de vivienda que los modelos anteriores, con la única diferencia de que en este modelo se incluyeron tres muros interiores perpendiculares a los muros largos; fig 19, la finalidad de esta variante fue estudiar la contribución de dichos elementos para resistir las fuerzas sísmicas.

Dos de los muros interiores se construyeron de tal manera que quedarán "amarrados" al muro largo más débil, que contenía los huecos correspondientes a una puerta y a una ventana. El tercer muro interior se "amarró" al otro muro largo que tenía sólo el hueco correspondiente a una puerta.

El modelo se fijó en la mesa en forma tal que las excitaciones fueran en dirección perpendicular a los muros largos ya

que se consideró que seguían siendo los más críticos. Por otro lado, no se empleó ningún sistema de techo propiamente dicho, sino que se colocaron masas equivalentes apoyadas directamente sobre los muros, representando un techo "pesado" rígido (por ejemplo un terrado). Vale la pena recordar que esta forma de ensaye resulta más desfavorable que la real, ya que no se proporciona prácticamente restricción alguna a los movimientos de los muros normalmente a su plano.

La instrumentación del modelo se logró, al igual que en modelos previos, por medio de seis acelerómetros colocados en sitios tales que proporcionaran información en aspectos como la variación de la aceleración con respecto a la altura y a la distancia a las esquinas. De esos acelerómetros, dos tenían un rango de medición de dos veces la aceleración de la gravedad, mientras que los cuatro restantes eran de una vez la gravedad. Los dos de mayor capacidad se sujetaron a cada uno de los muros -- largos en su parte superior y a la mitad de su longitud, ya que por experiencias previas se sabía que las aceleraciones máximas se presentaban en dichas zonas.

Previo a la aplicación de la vibración forzada, se llevó a cabo la prueba de vibración libre, en la cual se obtuvo un período de vibración de 0.095 segundos, que resulta un 12% mayor que el obtenido en el modelo 4 antes de ser vibrado.

En la Tabla 6 se consignan los valores del período de vibración y del porcentaje del amortiguamiento crítico de los modelos de la segunda etapa en su estado inicial.

Al igual que en pruebas anteriores, el modelo se sometió a incrementos graduales de la intensidad del sismo, desde un 36% hasta un 270% de la correspondiente al sismo real.

A partir de intensidades del orden de 140% de la real, comenzaron a aparecer las primeras grietas por flexión en los muros largos. El muro más largo, con un solo muro interior "amarrado" resultó ser el más dañado, presentando una importante grieta cercana a la unión con el muro interior, la cual se extendió desde el borde superior hasta cerca de la base, siguiendo una trayectoria casi vertical. La fig 20 muestra el aspecto del daño en cada uno de los muros largos al final del ensaye.

Al terminar el ensaye, el modelo presentaba un periodo de vibración dos veces el inicial y un amortiguamiento 2.6 veces el medido antes del ensaye. Al final de la prueba se pudo observar una importante dislocación entre los muros largos y los muros interiores. Estos elementos fueron capaces de absorber las fuerzas sísmicas y mantener el modelo como un continuo hasta que ocurrió el agrietamiento en la unión con los muros largos para una intensidad 50% mayor a la correspondiente del modelo sin muros interiores (modelo 4).

Sin embargo, de acuerdo con el criterio de falla establecido para los modelos anteriores, esta se alcanzó para intensidades entre 150% y 180% de la real, en donde el periodo de vibración y el amortiguamiento alcanzaron incrementos de 50% y 51% respectivamente. La intensidad de falla resultó 50% mayor respecto al modelo sin muros interiores.

#### 4.3.2.- SEPTIMO MODELO.- VIVIENDA DE ADO-

BE REFORZADA CON TIRANTES DE ACERO. - Este modelo fue el resultado de la reparación y refuerzo del modelo 6. La reparación consistió en rajuelear las - - grietas y rellenarlas con lodo. Durante este proceso se demolieron los tres-muros interiores con la finalidad de obtener una geometría enteramente similar a la de los modelos de la primera etapa y en particular al modelo 5, para permitir la comparación de resultados.

Una vez reparada la casa, se comenzó a reforzarla con el mismo procedimiento que el empleado en el modelo 5, es decir, utilizando varillas corrugadas de 5/16 de pulgada ( $A_s = 0.49 \text{ cm}^2$ ), que equivalen a barras de 1/2 pulgadas ( $A_s = 1.27 \text{ cm}^2$ ) en el prototipo. Estas varillas-se colocaron horizontalmente en el perímetro superior del modelo, a 12 centímetros (30 en el prototipo) por debajo del borde. En cada muro se colocaron-dos tirantes, uno hacia el interior del modelo y el otro hacia el exterior,- alojados dentro de ranuras en el muro para que quedaran a paño con las caras. La liga entre barras de muros perpendiculares se logró a través de placas de madera contra las cuales se atornillaron las tuercas de las varillas, fig 21

A diferencia del modelo 5, en el cual los tirantes horizontales constituyeron todo el sistema de refuerzo, en este modelo se incluyeron tirantes verticales, los cuales se colocaron en número de cuatro en cada una de las esquinas y dos en cada extremo de los muros largos libres.

En lo que respecta al anclaje de los ti--rantes verticales, este se logró soldando la punta de las varillas a la base metálica sobre la cual se construyó el modelo y por otro lado, el extremo superior de dichas barras se atornilló y se tensó ligeramente contra la parte-

superior del muro.

En el prototipo, el anclaje de los tirantes verticales se puede lograr ahogando las varillas en la cimentación; de no existir ésta, se debe hacer una pequeña excavación en la que se cuele un pequeño muerto de concreto que sirva de anclaje para los tensores.

Una vez colocado el refuerzo en el modelo se rellenaron las ranuras que alojaban a los tirantes usando yeso por razones de rapidez de ensaye, de tal manera de integrar por completo el sistema de refuerzo a los muros de adobe.

Posteriormente el modelo se fijó a la mesa vibradora de tal forma que la dirección del movimiento fuera perpendicular a los muros largos. Las masas equivalentes usadas fueron exactamente las mismas que las empleadas en el modelo 6.

La prueba de vibración libre a que se sometió la casa antes del ensaye reveló un periodo de vibración 18% superior - al inicial del modelo 6, lo cual se explica al igual que en todos los modelos dañados, porque la reparación de los daños no logra restituir la rigidez original.

El ensaye consistió en la aplicación del sismo de Oaxaca con la misma secuencia que para el modelo 6, incrementando la intensidad gradualmente para cubrir un rango desde 36% hasta 430% del sismo-real.



En la primera parte del ensaye, hasta el 100% de la intensidad, se observó una brusca disminución del amortiguamiento, lo cual pudo deberse a que el material que cubría las varillas se agrietó y el amortiguamiento que proporcionaban dichas barras se perdió súbitamente. Al proseguir con el ensaye, se presentó un intervalo en el cual el amortiguamiento casi no tuvo variación y el período de vibración se incrementó a un ritmo muy lento y uniforme, fig 22. Este intervalo fue del 100% hasta el 240% de la intensidad del sismo. A partir de esa intensidad, el amortiguamiento comenzó a incrementarse en forma notable. Sin embargo, los registros de vibración libre mostraron que aún para intensidades de hasta 350%, los diferentes muros vibraban en fase, aún cuando la mocheta que separaba la puerta de la ventana presentaba profuso agrietamiento, además de haber comenzado el desmoronamiento de los adobes en varias zonas del modelo.

Para intensidades superiores, se observó que aunque los muros largos vibraban prácticamente en fase, en los muros cortos perpendiculares a aquellos se superponían varios modos de vibrar.

El agrietamiento visible se produjo para una intensidad 2.4 veces la de la casa sin refuerzo (modelo 4) y 1.6 respecto a la de la casa que tenía muros interiores; mientras que resultó 1.4 veces la de la reforzada solo con tirantes horizontales.

El modelo se llevó hasta un estado de falla espectacular sin presentarse el colapso del mismo, comprobándose la eficiencia del sistema de refuerzo empleado, que si bien no proporciona la continuidad que da la malla de acero con aplanado, sí asegura la integridad de la construcción para aceleraciones sumamente fuertes.

Respecto al criterio establecido como falla, este modelo resistió una intensidad 2.9 veces la de la casa sin refuerzo y 1.9 veces la del modelo que tenía muros interiores.

**4.3.3.- OCTAVO MODELO.- VIVIENDA DE TABICON.-** En este modelo se modificó un aspecto de importancia en relación a todos los modelos anteriores, dicho cambio consistió en el material utilizado en la construcción del modelo. Los siete modelos previos se hicieron a base de adobe mientras que éste se fabricó con tabicones de cemento-arena.

La geometría del modelo fue similar a la de los modelos anteriores, sin incluir muros interiores, con la finalidad de comparar los resultados de este ensayo con los de ensayos previos.

Una factor de importancia fue el tipo de mortero empleado en la construcción del modelo que consistió en una mezcla de cal-arena en proporción 1:3, la decisión de utilizar un mortero de baja calidad se basó en la necesidad de apegar lo más posible las condiciones de los ensayos a las precarias características de las viviendas de muy bajo costo.

Por otro lado, no se empleó ningún sistema de techo propiamente dicho, sino que se colocaron masas equivalentes apoyadas directamente sobre los muros largos, reproduciendo un "techo ligero" (por ejemplo armadura de madera y tejas) que no presenta rigidez en su plano.

El modelo se colocó sobre la mesa de manera que la dirección del movimiento resultara perpendicular a los muros lar--

gos por considerarse que estos seguían siendo los más críticos. Sin embargo, los resultados finales del ensayo hicieron necesario un replantamiento de la consideración anterior.

La instrumentación del modelo se logró, - al igual que en modelos previos, por medio de seis acelerómetros colocados en la misma disposición que en el modelo 7.

Previo a la aplicación de la vibración - forzada, se llevó a cabo la prueba de vibración libre, en la cual se obtuvo un período de vibración de 0.23 segundos, que resulta 3.2 veces el obtenido en el modelo 4 antes de ser vibrado y 2.4 veces el del modelo 6 en las mismas condiciones.

Al igual que en los modelos 6 y 7, en el - ensayo del modelo 8 se utilizó exclusivamente el registro del sismo de Oaxaca.

De la misma manera que en pruebas anteriores, el modelo se sometió a incrementos graduales de la intensidad del sismo, desde un 40% hasta un 320% de la correspondiente al sismo real.

A partir de intensidades del orden de 80% de la real comenzaron a aparecer pequeñas grietas a lo largo de las juntas - en una de las esquinas del muro largo con ventana y puerta. Conforme se fue incrementando la intensidad de la excitación, se prolongaron las grietas en los muros largos, particularmente bajo la ventana, en donde, para una intensidad de 240% de la real, se tenía el aspecto que se muestra en la fig 23.--

Para ese estado de daño, se obtuvo un 87% y 75% de incremento en el periodo de vibración y en el amortiguamiento, respectivamente. A partir de ese nivel de excitación las grietas principales se presentaron en los muros cabeceros- (paralelos a la dirección del movimiento) por efecto de la fuerza cortante.- El aspecto final de dichos muros fue bastante espectacular, fig 24.

Al terminar el ensaye, el modelo presenta un periodo de vibración igual a 2 veces el inicial y un amortiguamiento - 100% mayor al medido antes del ensaye.

De acuerdo al criterio de falla establecido para los modelos anteriores, esta se alcanzó para una intensidad del 160% de la real, en donde el periodo de vibración y el amortiguamiento alcanzaron incrementos de 52% y 75% respectivamente. La intensidad de falla resultó prácticamente la misma que en el modelo 6.

4.3.4.- NOVENO MODELO.- VIVIENDA DE TABICÓN REFORZADA.- Este modelo fue el resultado de la reparación y refuerzo del modelo 8. La reparación, al igual que en ocasiones previas consistió en rajar las grietas y rellenarlas con mortero cemento-arena en proporción - 1:3. Cabe destacar la importancia de que la reparación de daños en viviendas de tabicón se realice con un mortero de buena calidad ya que de otra manera, difícilmente se podrán obtener resultados satisfactorios.

Una vez reparadas las grietas, la estructura se reforzó utilizando una combinación de los sistemas empleados con anterioridad. Dicho sistema consistió por una parte en la construcción de una viga cadena perimetral en el extremo superior de los muros, de sección trans

versal cuadrada, con cuatro varillas longitudinales de 5/32 de pulgada en el modelo, que equivalen a varillas de 1/2 de pulgada en el prototipo. Como refuerzo transversal se utilizó alambre del número 12 AWG que equivale aproximadamente a estribos de alambón de 1/4 de pulgada en el prototipo; a continuación se colocaron tirantes de acero verticales en la misma disposición y número que los colocados en el modelo 7, fig 25. Sin embargo, para este ensaye no se cubrieron los tirantes con mortero debido a que no se ranuraron los muros para ocultar los tirantes sino que quedaron a paño de los mismos para no debilitarlos. La instrumentación del modelo 9 consistió en seis acelerómetros colocados en la misma posición que en los modelos anteriores.

Como sistema de techo se utilizaron las mismas masas equivalentes colocadas en el modelo 8, es decir, se simuló un techo ligero.

La dirección del movimiento se aplicó perpendicular a los muros largos y el ensaye se realizó utilizando exclusivamente el registro del sismo registrado en la Ciudad de Oaxaca.

Previo a la aplicación del sismo, se efectuó la prueba de vibración libre, en la cual se obtuvo un periodo de vibración de 0.14 segundos, que es 40% menor que el obtenido en el modelo 8, esto se explica por la rigidización que proporcionan tanto los tirantes verticales como la viga cadena de concreto.

La secuencia de prueba reprodujo fielmente la utilizada para el modelo 8 pero en esta ocasión no se detectaron grietas sino hasta una intensidad igual al 360% de la del sismo real. Conforme -

se incrementó la intensidad, las grietas se hicieron más extensas hasta que para el 480% de la intensidad real, los muros cabeceros presentaban importantes grietas a 45° (a lo largo de las juntas) como se ilustra en la fig 26. Sin embargo, para ese mismo nivel de intensidad, la prueba de vibración libre - permitió calcular un periodo de vibración tan solo 29% superior al inicial y un incremento en el amortiguamiento de 60%.

Lo anterior es una excelente prueba de la efectividad del sistema de refuerzo implementado que aún permitió someter al modelo a una intensidad cercana al 600% con respecto a la del sismo real, - sin provocarse el colapso y conservándose incrementos de 29% y 100% para el periodo de vibración y el amortiguamiento respectivamente. Al final del ensayo el modelo presentaba importantes grietas en los muros largos, fig 27.

4.4.- ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS.- Debido a las limitaciones de los ensayos, provenientes tanto de las características del equipo empleado como de las condiciones del material durante las pruebas y de las restricciones impuestas a los modelos por el análisis dimensional, algunos resultados no son extrapolables de manera cuantitativa al prototipo; el movimiento aplicado a la mesa fue en una sola dirección, no se reprodujo por tanto el efecto de aceleraciones verticales que, - para construcciones como las estudiadas y para sismos de epicentro cercano, - pueden afectar de manera importante la resistencia; de igual forma las limitaciones de desplazamiento de la mesa obligaron a filtrar los movimientos de periodos largos del sismo, los cuales son importantes cerca del colapso, - - cuando la construcción o parte de ella han perdido gran parte de su rigidez; por otra parte los modelos no estuvieron expuestos al intemperismo que altera en forma no despreciable las propiedades de los materiales, y los vuelven

más vulnerables; finalmente no se pudieron reproducir fielmente los refuerzos debidos a peso propio; como se mencionó anteriormente, se piensa que el efecto de esta modificación debe haber sido pequeño, excepto quizá cerca del colapso cuando los efectos de segundo orden producidos por el peso de los muros fueron subestimados en el modelo.

Por las razones anteriores sería poco conservador extrapolar las intensidades sísmicas de fall al prototipo. Es poco creíble que en una situación real una casa sin refuerzo pueda resistir sin colapso total un sismo con una aceleración máxima del terreno de 0.3 g y una ordenada espectral de 0.5 g para el período fundamental de la vivienda intacta. Se considera sin embargo que los resultados son válidos antes de que los modelos sufrieran daños cuantiosos que produjesen reducciones notables en su rigidez; y que, sobre todo, permiten comparar cualitativamente el comportamiento y modos de falla de las viviendas con diferente tipo de refuerzo.

Una primera interpretación cuantitativa de los resultados la ofrece la posibilidad de comparar los períodos y modos de vibrar medidos en los modelos para intensidades pequeñas con los valores obtenidos del análisis dinámico por elementos finitos del tipo de los mencionados en la ref 1.

Despreciando el efecto de la abertura de ventana, ver fig 15, la construcción ensayada tiene dos ejes de simetría y se puede por tanto realizar el análisis considerando solo una cuarta parte de ella en la forma mostrada en la fig 30; variando la rigidez del elemento de borde superior se puede reproducir el efecto de la rigidización impuesta por la cadena perimetral o por un techo que forme diafragma.

Con el modelo teórico mencionado se determinó un período natural de vibración de 0.09 segundos para la casa sin refuerzo y de 0.07 segundos para la reforzada con cadena. Los períodos obtenidos a partir del modelo físico fueron 0.079 y 0.067 segundos respectivamente.

La aceptable concordancia observada entre los períodos y distribuciones de aceleraciones medidas y calculadas permite asignar validez a los análisis teóricos en que se supone para las construcciones de adobe un comportamiento elástico e isotrópico; por tanto dichos análisis son confiables para predecir el comportamiento, antes de que ocurran daños de importancia, de una gran variedad de construcciones de este tipo, estudiando por ejemplo el efecto de distintas geometrías y de la cantidad y posición de huecos.

Otro aspecto de los resultados que merece evaluarse en forma cuantitativa es el de la variación del período fundamental y del amortiguamiento obtenidos de las pruebas de vibración libre, a medida que el modelo había sido sometido a intensidades sísmicas crecientes. El aumento del período refleja una pérdida de rigidez de la estructura y el del amortiguamiento una mayor disipación de energía a través de fricción en grietas; por tanto ambos parámetros se interpretan como índices del nivel de daño.

Como ya se ha dicho, el deterioro provocado a los modelos en las distintas etapas de prueba se presentó progresivamente; de la observación visual del nivel de daño y de la evaluación de las mencionadas propiedades dinámicas de los modelos se puede establecer que si el período se incrementa menos de 10% y el aumento del amortiguamiento no rebasa



el 20% respecto a los valores iniciales, la estructura se puede considerar aún en buen estado, el nivel de daño es mínimo e imperceptible a simple vista. Si se tienen incrementos entre el 10% y 20% en el período y entre el 20% y el 50% en el amortiguamiento, el nivel de daño es ligero, pero una observación minuciosa permite detectar pequeñas grietas por flexión en los muros - perpendiculares a la dirección del sismo. Cuando el nivel de daño aumenta al grado que las grietas por flexión se descubren a simple vista y comienzan - aparecer grietas por cortante, los incrementos en el período y amortiguamiento estarán por debajo del 50% y 100% respectivamente. Si los incrementos superan los últimos porcentajes, el estado del modelo es tal que las grietas se abren hasta permitir el paso de la luz, y en general podría afirmarse que un prototipo sometido a un movimiento equivalente al que soportó el modelo, llegaría al colapso.

Respecto al comportamiento de cada modelo en particular puede afirmarse que el primer modelo no soportó sin daño grave el 50% de la intensidad del sismo de El Centro, y con el 90% del mismo, se llevó prácticamente a la falla. El segundo modelo, gracias al refuerzo proporcionado por la viga cadena, soportó sin daño aparente movimientos equivalentes a 90% de la intensidad de los temblores de El Centro y Managua; al someterse al acelerograma del sismo de Oaxaca alcanzó un estado de daño leve - con una intensidad equivalente a casi dos veces la del sismo original, y fue necesario someterlo a un movimiento 3.6 veces el real para llevarlo a lo que se consideró la falla.

El modelo 3 contaba con el sistema de refuerzo que resultó más eficiente, pues los movimientos representativos de - los sismos de El Centro y Managua provocaron niveles de daño que instrumental

mente se determinaron menores a los correspondientes del modelo anterior, y con 450% de la intensidad del sismo registrado en Oaxaca se llevó a un estado de daño más aparatoso que real, pues aunque se manifestaban fisuras en el aplanado, la malla fue capaz de mantener la continuidad y preservar la estructura en condiciones de resistir nuevamente movimientos de la máxima intensidad posible, dada la potencia del actuador de la mesa vibradora. Desafortunadamente este sistema de refuerzo tiene la desventaja de ser más complicado y costoso.

Con el modelo 4 ocurrió un fenómeno raro, a diferencia de los otros cuatro, el período creció más que el amortiguamiento y constituye una excepción a la relación establecida entre la modificación de las propiedades dinámicas y el nivel de daño. La intensidad del movimiento que llevó este modelo a un estado de agrietamiento fué similar a la correspondiente del primer modelo, la única diferencia fue que este se probó con el movimiento representativo del temblor registrado en Oaxaca, y aquél con el de El Centro.

Por otro lado el refuerzo con los tirantes en el modelo 5 resultó de suficiente utilidad para mantener la liga entre los muros a pesar del agrietamiento, pues permitió que el modelo se sometiera a movimientos del doble de la intensidad que llevó a la falla los modelos sin refuerzo, si bien no fue tan eficiente como los otros sistemas de refuerzo, ya que se manifestaron niveles de daño considerable con movimientos iguales a los que los modelos 2 y 3 soportaron sin daño aparente. Es conveniente recalcar que a pesar del nivel de daño provocado, los tensores permitieron mantener unidos los muros y lograr que siguieran trabajando en conjunto, al grado que fue posible aprovechar el modelo para girarlo y probarlo -

nuevamente con la excitación paralela a los muros largos de manera que estos trabajaran a cortante. Esta última prueba sirvió para verificar que las zonas de muros entre huecos de puertas y ventanas están en condiciones muy desfavorables ante una sollicitación que les induzca esfuerzos cortantes. La intensidad máxima del movimiento aplicado al modelo en esta posición fue de 225% de la del sismo de Oaxaca, pero desde niveles del orden de 90% aparecieron las grietas de cortante entre los huecos.

En cuanto al modelo 6 se puede decir que los muros interiores proporcionaron una cierta rigidez adicional que se tradujo en una intensidad de falla 50% mayor respecto al modelo sin muros interiores (modelo 4). Sin embargo, se considera que la presencia de dichos muros como elementos resistentes no resulta suficiente para tomar efectos de sismo ya que en el ensaye de este modelo se observó que la liga entre muros interiores y muros largos se agrietó para intensidades del orden de 150% de la del sismo real.

El modelo 7 permitió evaluar la eficiencia del uso combinado de tirantes horizontales en toda la periferia así como de tirantes verticales tanto en las esquinas como también a uno y otro lado de los huecos de puertas y ventanas. El ensaye del modelo demostró la contribución considerable que proporcionaron los tirantes verticales, incrementando la intensidad de falla en un 40% aproximadamente con respecto al modelo 5.

Se pudo comprobar con dicho modelo que el uso de tirantes verticales y horizontales asegura la integridad de la construcción para aceleraciones sumamente fuertes ya que inclusive para intensidades de 350% de la del sismo real, los diferentes muros vibraban en fase.

En el modelo 8 se introdujo un cambio --- importante que consistió en construir el modelo con tabicón de cemento y arena usando en las juntas un mortero muy pobre (cal y arena). La importancia - de este modelo se basó en la necesidad de contar con datos que permitieran - evaluar el comportamiento de viviendas de tabicón no reforzadas bajo los efectos de un sismo. Resultó de gran interés el hecho de que los principales daños al modelo se presentaron en los muros cortos por efectos de la fuerza -- cortante. Por otro lado, la intensidad de falla resultó prácticamente la misma que para el modelo 6.

Por último, en el modelo 9 se combinaron dos sistemas de refuerzo; la viga cadena y los tirantes verticales. El ensaye de este modelo comprobó la bondad del sistema de refuerzo empleado ya que el tipo de grietas en el muro largo con puerta y ventana se presentó en los modelos 8 y 9 para intensidades de 120% y 360% de la del sismo real, es decir, en lo que respecta al daño sufrido por ese muro, el modelo 9 tuvo una resistencia tres veces la del modelo sin reforzar.

El estado de falla en los muros cortos - que se presentó en el modelo 8 para una intensidad de 240% con respecto a la del sismo real, no se igualó en el modelo 9 sino hasta que este fue sometido al doble de dicha intensidad (480%).

Por otro lado, los registros obtenidos durante las pruebas de vibración libre revelaron un incremento gradual y pequeño en el período de vibración, fig 22, el cual al final del ensaye resultó - apenas un 29% superior al registrado al inicio de la prueba.

En cuanto a la variación en el amortiguamiento, se presentó en forma igualmente lenta y el incremento de 50% en dicho índice correspondió a una intensidad de 380% la del sismo real.

5.- RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE VIVIENDA DE BAJO COSTO EN ZONAS SISMICAS.

5.1.- ANALISIS SISMICO.- En el presente-capítulo se habla sobre los resultados de los estudios analíticos (ref 2) que tuvieron como objetivo investigar el comportamiento dinámico de las viviendas típicas de adobe, para generar procedimientos sencillos para la revisión de su seguridad y recomendaciones específicas sobre su refuerzo.

El comportamiento sísmico de estructuras-similares a las ensayadas es más complejo que el de edificios usuales, en los que puede suponerse que las masas están concentradas a determinadas alturas; las casas de adobe no pueden reducirse a una estructura esquelética y la mayor parte de su masa está distribuida en la altura, por tanto, para un análisis sísmico razonablemente aproximado debe recurrirse a uno del tipo modal espectral mediante elementos finitos.

De los espectros para distintas zonas y tipos de suelo se eligió el correspondiente a la zona D y suelo firme, fig 28, por ser frecuente que las construcciones en estudio se encuentren en tales condiciones. El espectro se usó sin ninguna reducción por ductilidad, ya que, las construcciones de adobe son muy frágiles. Los resultados fueron expresados en función de la ordenada espectral y éstos los hace aplicables a espectros modificados a otras escalas.

Entre los puntos importantes observados durante el estudio antes mencionado está el hecho de que el cortante máximo no se presenta en la base de los muros, como sucede en la mayoría de las - -

construcciones, lo cual se debe a la influencia del segundo modo de vibración, fig 29. En lo referente a los momentos flexionantes, los resultados del análisis revelaron que, salvo en los casos con cadena en que la relación L/H, fig 30, era superior a 2.5, el momento máximo se presentó en las esquinas. Por considerarse que relaciones superiores a ese valor estarían fuera de intervalos aceptables en la práctica, se concentró la atención en los máximos valores de M que correspondieron a los producidos en la parte superior de las esquinas de los casos estudiados, Tabla 7.

En la Tabla 8 aparecen los máximos valores de V y M para cada caso, así como los de  $V^*$  y  $M^*$  que se obtienen al dividir aquellos entre la ordenada espectral correspondiente al primer modo.

En la fig 31a, se puede apreciar que, para valores fijos de H, B y t, fig 30, a incrementos de L no corresponden incrementos de  $V^*$ ; esto se debe a que una parte del muro perpendicular a la dirección del sismo se apoya directamente en el suelo y, conforme crece L, disminuyendo la parte que se apoya en los muros transversales. Si se incluye la cadena perimetral, o se rigidiza el techo y se liga eficientemente a los muros se logra que una mayor parte del muro frontal se apoye en los transversales, por lo que  $V^*$  aumenta.

El efecto de la variación de L sobre  $M^*$  se aprecia en la fig 32a, para valores pequeños de L, la parte del muro frontal que se apoya en los transversales actúa como una viga con dos apoyos por lo que, aún para valores grandes de  $V^*$ , se tienen valores pequeños de  $M^*$ ; conforme crece L, la parte del muro frontal que se apoya en las transversales disminuye, lo que hace decrecer a  $V^*$ , aunque  $M^*$  crece porque ésta parte-

empieza a comportarse como dos vigas en voladizo. Este comportamiento es -- tan franco a partir de cierto valor de  $L$ , que  $M^*$  disminuye a la par que  $V^*$ , si  $L$  aumenta.

Según se observa en las fig 31b y 32b, - tanto  $M^*$  como  $V^*$  son funciones crecientes, prácticamente lineales de  $H$ , al mantener fijas las dimensiones  $L$ ,  $B$  y  $t$ . Esto se explica porque al aumentar la altura, crecen la masa y las aceleraciones laterales que produce el - - temblor. Lo mismo ocurre si, con  $L$ ,  $B$  y  $H$  constantes, se incrementa  $t$ .

Se observa que la viga perimetral de concreto en la parte superior de los muros, a la vez que provoca un incremento de  $V$ , ocasiona una disminución del orden del 70% en los valores de  $M$ . Esto se debe a que dicha viga hace las veces de un apoyo en la parte superior - del muro frontal que a su vez descansa en los muros laterales, y sus efectos son por un lado disminuir la parte del muro frontal que se apoya directamente en el suelo, lo que provoca el incremento de  $V$ , y por otro reducir las - deformaciones por flexión, lo cual implica una disminución en los valores - de  $M$ . Del estudio se concluyó que en general la presencia de la cadena no - provoca un aumento crítico en los esfuerzos cortantes, pero sí una disminu- ción muy importante de los esfuerzos de tensión por flexión, ésto se comprobó con lo observado durante la etapa experimental.

Por otro lado, si el techo es muy rígido y se encuentra bien ligado a los muros, el cortante en los muros transversales es casi el doble del correspondiente al caso con cadena y el momento - flexionante en la esquina prácticamente desaparece.



### Método Simplificado de Análisis Sísmico.

Con base en los resultados obtenidos mediante el análisis con elementos finitos, se propuso una forma aproximada para calcular las fuerzas sísmicas - de diseño para estructuras de adobe de planta rectangular. Se obtuvieron expresiones para el cálculo de las fuerzas cortantes y momentos flexionantes-máximos, las cuales se apegan satisfactoriamente a los resultados del análisis dinámico, aunque su precisión no está garantizada en casos donde alguna de las variables difiera radicalmente de los límites establecidos.

Ya que las expresiones desarrolladas incluyen la ordenada espectral correspondiente al periodo fundamental de la estructura y que no se cuenta con fórmula alguna para estimar dicho periodo, se recomienda usar siempre la ordenada correspondiente a la zona plana del espectro, sin tomar en cuenta la posible reducción por el periodo.

Para obtener la fuerza cortante a que se verá sometida una estructura de adobe se ha buscado aplicar la expresión usual en los métodos estáticos:  $V = C_s W$ , con la variante de que el peso  $W$ , no será el total de la estructura porque como se mencionó, parte del muro frontal se apoya directamente en el suelo por lo que no contribuye al cortante generado en los muros laterales; además no toda la masa vibra con la misma aceleración, sino que ésta varía con la altura. Con esto en mente se ha procurado definir una masa equivalente que, activada con la aceleración-máxima representada por la ordenada espectral  $C_s$ , genere una fuerza similar a la que se obtuvo en el análisis dinámico.

En la fig 33 se muestra la parte de los muros, del techo, y de la cadena en su caso, que es necesario considerar pa

ra determinar el peso  $W$  con el cual se obtiene el valor de  $V'$ ;  $L'$  y  $H'$  toman los siguientes valores:

En los casos sin cadena	$L' = 2H^2/L \leq L$ ; $H' = H/4$
En los casos con cadena	$L' = 3H^2/L \leq L$ ; $H' = H/3$
En los casos con techo rígido	$L' = L$ ; $H' = 0.6 H$

El mismo procedimiento puede aplicarse para determinar la fuerza cortante en el muro longitudinal, el cual puede llegar a ser crítico por la presencia de huecos de puertas y ventanas que reducen su área efectiva para resistir cortantes.

El momento flexionante que debe resistir una estructura de adobe por unidad de longitud se puede calcular mediante la expresión  $M = C_s w b^2/K$ , en donde:

$b = H$  ó  $L/2$ , el menor, en cm.

$K = 20$  ó  $5$  para casos con y sin cadena respectivamente.

$w =$  peso por unidad de longitud obtenido al considerar 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 (en Kg/cm o Ton/m)

Si no hay muro intermedio, cada muro transversal debe resistir el 50% de  $V$ , en caso contrario se debe obtener el  $V$  que corresponde a cada cuarto independientemente y atribuir al muro común el 60% y el 40% restante al muro exterior correspondiente.

## 5.2.- ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.- Las defi--

ciencias de las viviendas de adobe y en general de las de mampostería no reforzada, en lo que se refiere a su resistencia a sismos, están claramente identificadas; ésto permite establecer recomendaciones concretas para subsanar sus defectos. Los procedimientos de refuerzo deben mejorar las siguientes características, en orden de prioridad.

Rigidización de los Techos.- Se requiere que las fuerzas de inercia puedan transmitirse a los elementos que sean capaces de resistirlas por medio de esfuerzos en su plano (muros alineados en la dirección de sismo); para ello es necesario que exista un elemento con alta rigidez horizontal a nivel del techo. Es conveniente rigidizar el techo para que forme diafragma por medio de un contraventeo en su plano. Una viga rígida (de concreto o madera) en el extremo superior del muro cumple parcialmente esta función.

Liga de los muros entre sí y con el techo.- La unión de los muros en las esquinas por el simple cuatrapeo, y la de éstos con el techo por medio del empotramiento directo de las vigas en el adobe, son muy poco eficientes. Se requiere de elementos que permitan una mejor liga. La viga corona de concreto o madera permite, por ejemplo, realizar una mejor unión entre los elementos.

Incremento de la resistencia en flexión de los muros.- Esto puede lograrse reduciendo las longitudes libres de los muros y sus alturas, con una mayor subdivisión del espacio interior o con elementos de refuerzo horizontal de acero, madera o caña.

Proporcionar cierta ductilidad.- Es impor

tante disminuir el carácter altamente frágil de la falla de las construcciones de adobe. Esto puede lograrse con elementos de concreto que confinen - los muros en todo su perimetro o con refuerzo vertical y horizontal, siempre que éste se encuentre adecuadamente anclado al adobe.

Protección contra intemperización.- Es necesario que tanto el adobe como la madera no vean afectada su resistencia por efecto de la intemperie. Por lo que respecta a los muros, la protección puede lograrse aislando el adobe de la humedad por medio de aleros en los techos y de zoclos de piedra en la base o por medio de un recubrimiento por ejemplo con mortero de cemento.

De los estudios realizados se desprende que el procedimiento de refuerzo más eficaz es a través de una malla de acero clavada en ambas caras del muro y con las precauciones descritas para asegurar la continuidad y liga entre los muros. Este sistema proporciona además una protección al adobe contra el intemperismo, manteniendo íntegras - sus propiedades con el tiempo. Su inconveniente es el relativo costo de materiales y la dificultad de realizarlo sin mover el techo.

Un procedimiento que tiene una eficiencia menor, pero que es mucho más económico y sobre todo fácil de colocar sin alterar la habitabilidad de la vivienda durante la construcción es el de tirantes. Los tirantes horizontales ensayados en la primera etapa mostraron - su habilidad para mantener unidos los muros aún ante intensidades sísmicas elevadas. Sin embargo, el nivel de daño es muy alto y conviene añadir, como se comprobó en la segunda etapa, un conjunto de tirantes verticales en los huecos y en las esquinas. Vale la pena aclarar que resulta de suma importan

cia el correcto anclaje de los tirantes verticales en la cimentación de la vivienda o bien a través de pequeños muertos de concreto fabricados para tal efecto.

Finalmente, el refuerzo con viga cadena en el extremo superior fue más eficaz que los tirantes, aunque no impidió un daño importante en las esquinas de los muros en las que resulta muy conveniente colocar un refuerzo vertical del tipo de los tirantes de acero. Es te procedimiento tiene también el inconveniente de requerir la remoción total o parcial del techo para su implementación.

Con respecto a los ensayos en mesa vibratoria realizados, puede concluirse que, aún reconociendo las limitaciones que presentan por la reproducción sólo parcial de los efectos sísmicos y por la imposibilidad de representar en el modelo todas las características del prototipo, se considera que constituyen una excelente manera de evaluar cualitativamente el comportamiento sísmico y de comparar la eficacia de diversos procedimientos de refuerzo.

## R E F E R E N C I A S

- 1.- Meli R., "Investigación sobre vivienda en el Instituto de Ingeniería". Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 2.- Bazan E., Padilla M., Meli R., "Análisis Sísmico de Vivienda de Adobe". Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 3.- Meli R., y Reyes G.A., "Propiedades Mecánicas de Mampostería", Instituto de Ingeniería, Informe No. 237, México, (Sept. 1969).
- 4.- Meli R., "Bases para los criterios de diseño estructural del proyecto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Revista Ingeniería, Vol. XLVI, No. 2, (Junio 1976).
- 5.- Escalante P.C. y Merrifield C.C., "Casas de adobe antisísmicas", Dirección General de Servicios Técnicos, SAHOP. (Informe Interno) (Septiembre 1977).
- 6.- Pinar, "Historical and modern earthquake - resistant construction in - Turkey, Proc. IWCEE, Berkeley, 1956.
- 7.- Yamashiro K.R., Sánchez O.A. y Morales M.R., "Diseño Sísmico de construcciones de adobe y suelo estabilizado", Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1975.
- 8.- Padilla M., "Análisis Sísmico de Viviendas de Adobe", Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1977.

- 9.- Hernández O., Meli R., Padilla M., "Refuerzo de Vivienda Rural en Zonas Sísmicas". Instituto de Ingeniería, UNAM, 1979.
  
- 10.- Koerner R. M. et al "Bamboo Reinforcement of Model Adobe Walls Subjected to Lateral Loads", Memorias, Conferencia Centroamericana de Ingeniería Sísmica, San Salvador, 1978.

TABLA 1. RESISTENCIA A COMPRESION Y A TENSION POR FLEXION DE ADOBES.

PROCEDENCIA	COMPRESION Kg/cm <sup>2</sup>	TENSION Kg/cm <sup>2</sup>
Chiapas	16.0	2.0
Chiapas	9.9	*
Chiapas	7.9	4.0
Guatemala	9.1	*
Guerrero	8.1	3.0
Guerrero	5.2	4.4
Oaxaca	9.3	*
Oaxaca	13.5	2.0
Media	9.9	3.1
Coef. de var.	0.34	0.36

TABLA 2. PROPIEDADES MECANICAS DE MAMPOSTERIA DE ADOBE.





TIPO DE ENSAYE	MORTERO	RESISTENCIA Kg/cm <sup>2</sup>	MODULO DE - ELASTICIDAD Kg/cm <sup>2</sup>
 Compresión axial en - pila	L o d o 1: 2: 9 0: 1: 3	13.5 + 13.4 14.0 Se despegaron los especímenes durante su manejo.	2500 2500 5000
 Cortante - por compresión diagonal.	L o d o 1: 2: 9 0: 1: 3	1.4 + 1.2 2.6 0.7	+ Adobes de 10 x 16 x 60 en el resto de los ensayos se emplearon adobes de 4 x 16 x 24 cm.  Los resultados son promedio de al menos tres ensayos.
 Cortante - directo.	L o d o	0.7	
 Flexión en murete.	L o d o	2.6	



TABLA 3. VALORES MAXIMOS DE ACELERACION Y DESPLAZAMIENTO DE LOS ACELEROGRAFAS EMPLEADOS.

	Aceleracion g			Desplazamiento en cm.		
	Original	Corregido	Modelo	Original	Corregido	Modelo
El Centro	0.35	0.34	0.85	12	6.96	2.78
Managua	0.37	0.34	0.85	33	7.40	2.96
Oaxaca	0.20	0.20	0.50	3	0.72	0.29

TABLA 4. VALORES INICIALES DEL PERIODO NATURAL Y LA FRACCION DEL AMORTIGUAMIENTO CRITICO EN LOS MODELOS DE LA PRIMERA ETAPA.

MODELO	To (seg)	$\xi$ (%)
1	0.079	1.8
2	0.068	1.7
3	0.080	1.5
4	0.072	4.4
5	0.110	4.7
5*	0.035	1.9

\* vibración normal al lado corto del modelo

TABLA 5. PROPIEDADES MECANICAS DE MAMPOSTERIA DE CEMENTO - ARENA.



TIPO DE ENSAYE		MORTERO	RESISTENCIA PROMEDIO Kg/cm <sup>2</sup>
	Compresión axial en pila.	Cal : Arena 1 : 3	24.8
	Cortante - por compresión diagonal	Cal : Arena 1 : 3	1.4

TABLA 6. VALORES INICIALES DEL PERIODO NATURAL Y LA FRACCION DEL AMORTIGUAMIENTO CRITICO EN LOS MODELOS DE LA SEGUNDA ETAPA.

MODELO	T <sub>o</sub> (seg)	$\xi$ (%)
6	0.095	2.7
7	0.113	2.8
8	0.23	5.0
9	0.14	4.0

TABLA 7. CASOS ANALIZADOS.

CASO	t (m)	L (m)	H (m)	MODO	SIN CADENA		CON CADENA	
					T (seg)	C <sub>s</sub> (g)	T (seg)	C <sub>s</sub> (g)
I	0.4	7.35	2.8	1	0.225	0.48	0.142	0.46
				2	0.072	0.28	0.055	0.23
II	0.2	7.35	2.8	1	0.489	0.48	0.297	0.48
				2	0.152	0.48	0.094	0.33
III	0.6	7.35	2.8	1	0.146	0.47	0.102	0.35
				2	0.051	0.22	0.047	0.21
IV	0.4	4.00	2.8	1	0.123	0.41	0.077	0.29
				2	0.052	0.23	0.043	0.20
V	0.4	5.00	2.8	1	0.166	0.48	0.096	0.34
				2	0.054	0.23	0.048	0.21
VI	0.4	10.00	2.8	1	0.270	0.48	0.194	0.48
				2	0.110	0.38	0.066	0.26
VII	0.4	7.35	2.4	1	0.187	0.48	0.123	0.41
				2	0.067	0.26	0.048	0.21
VIII	0.4	7.35	3.5	1	0.281	0.48	0.170	0.48
				2	0.079	0.30	0.067	0.26
IX	0.4	7.35	2.8*	1	0.104	0.36	0.081	0.30
				2	0.059	0.24	0.054	0.23
X	0.4	7.35	2.8**	1	0.376	0.48	0.206	0.48
				2	0.118	0.40	0.065	0.26
XI	0.4	7.35	2.8***	1	0.079	0.30		
				2	0.039	0.19		
XII	0.4	planta elíptica		1	0.122	0.41		
				2	0.093	0.33		
XIII	0.4	planta circular		1	0.100	0.35		
				2	0.079	0.30		

\* Muro divisorio al centro

\*\* Techo pesado

\*\*\* Techo rígido ligado a los muros

TABLA 8. ELEMENTOS MECANICOS MAXIMOS OBTENIDOS CON EL ANALISIS DINAMICO.

CASO	SIN CADENA				CON CADENA			
	V (ton)	V* (ton)	M (Kgm/m)	M* (Kgm/m)	V (ton)	V* (ton)	M (Kgm/m)	M* (Kgm/m)
I	2.74	5.71	461	960	5.51	11.98	158	343
II	1.74	3.54	260	542	2.67	5.56	82	171
III	3.85	7.54	657	1398	6.30	18.00	193	551
IV	2.64	6.44	258	629	4.83	16.66	62	214
V	3.06	6.38	410	854	5.09	14.97	99	291
VI	2.49	5.19	448	933	5.01	10.44	179	373
VII	1.85	3.85	337	702	3.72	9.07	104	254
VIII	4.66	9.71	717	1494	8.12	16.92	239	498
IX	5.67	15.75	184	511	8.08	26.93	50	167
X	6.01	12.52	1050	2188	9.16	19.08	294	613

V\*, M\* Cortantes y momentos divididos entre la ordenada espectral.

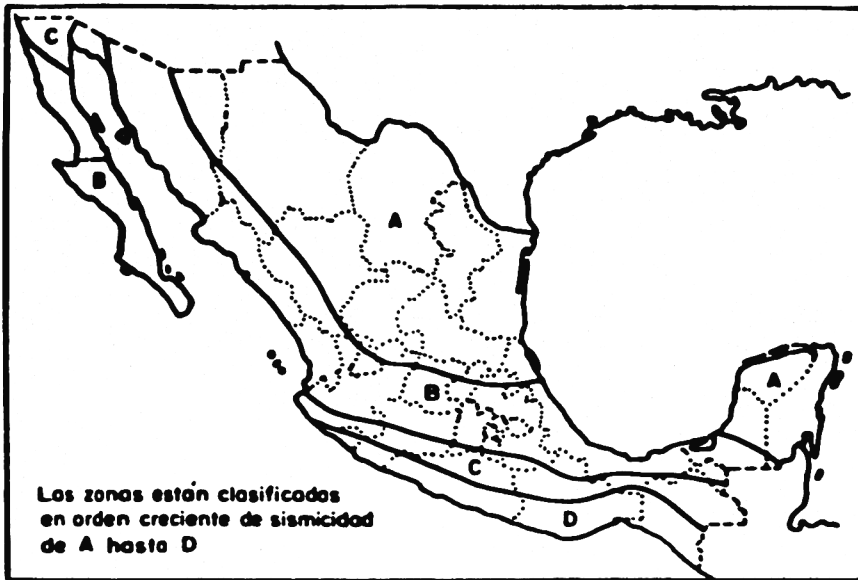
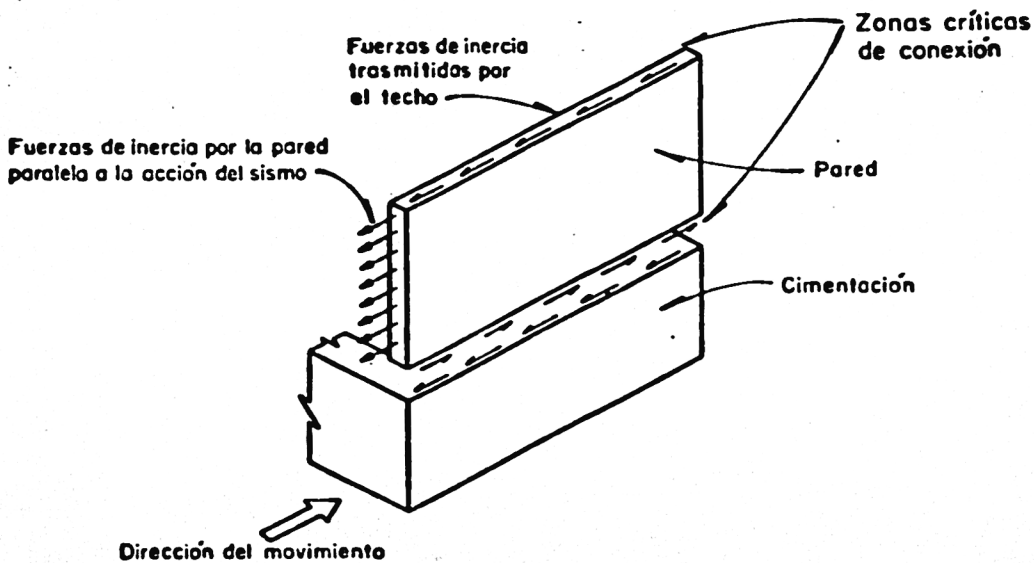
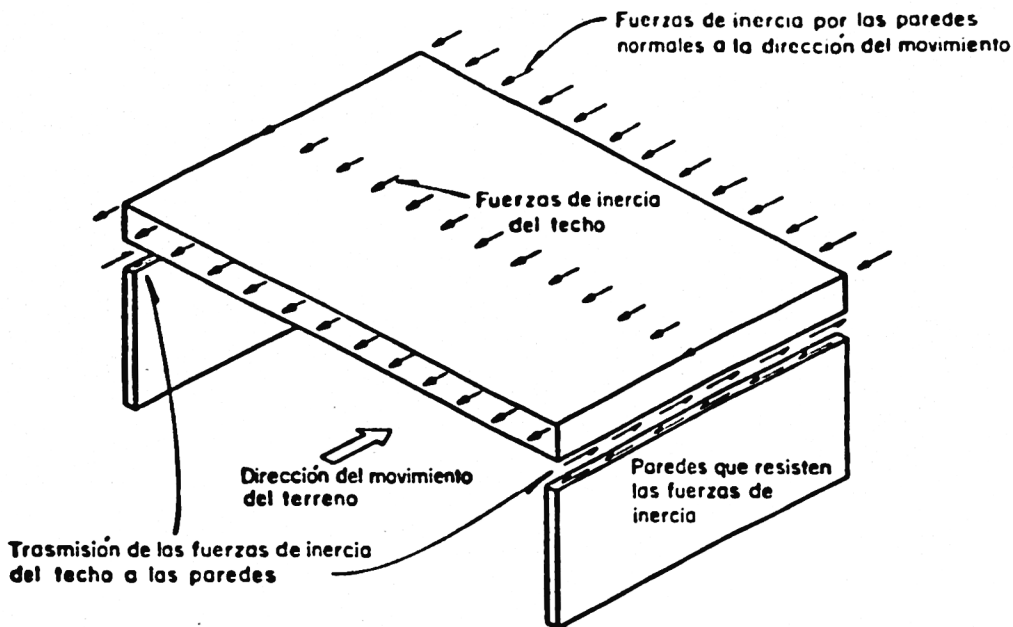


Fig 1 Regionalización sísmica de la República Mexicana



Trasmisión de las fuerzas de inercia a la cimentación

Fig 2 Fuerzas que actúan en las paredes cuando el techo es un diafragma rígido (ref 8)

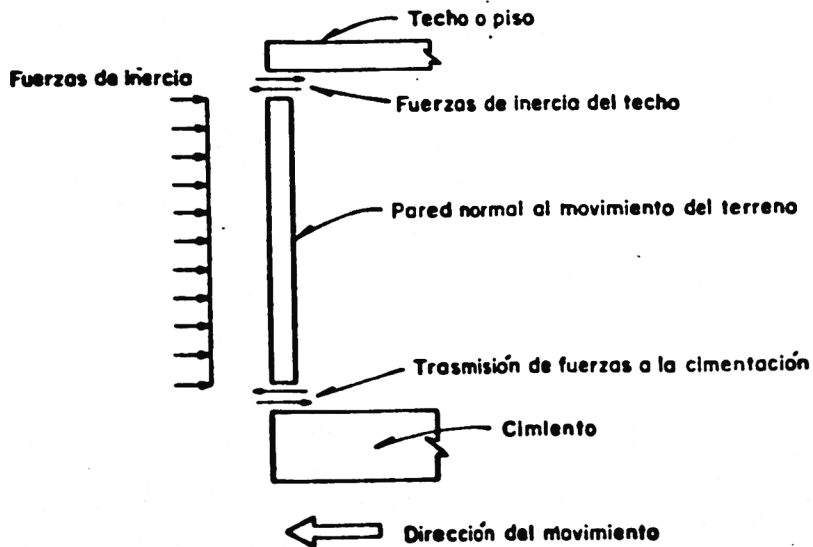
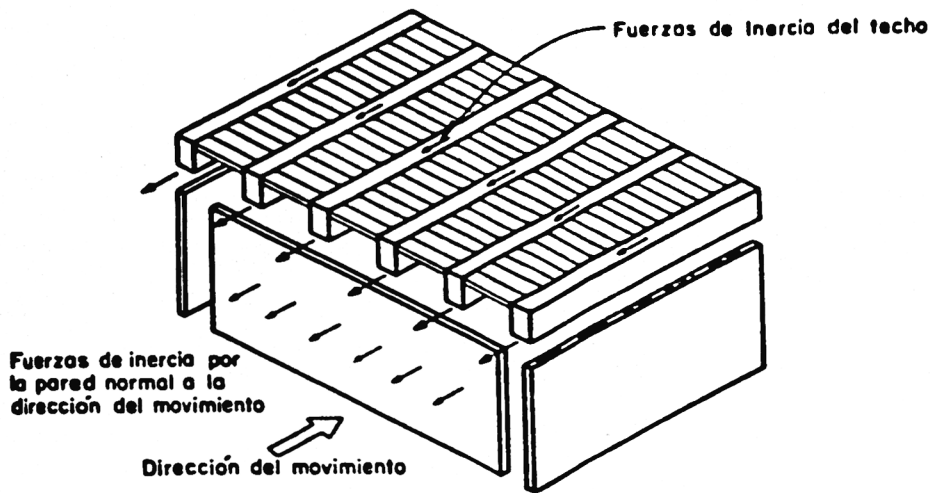


Fig 3 Fuerzas en las paredes cuando el techo no tiene rigidez en su plano (ref 8)

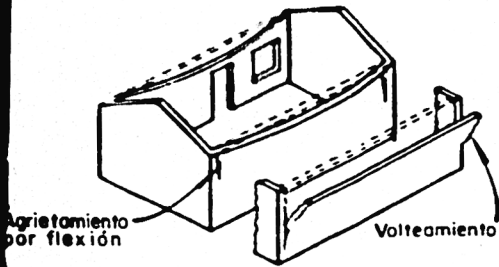


Fig 4 Falla por flexión y volteamiento (ref 8)

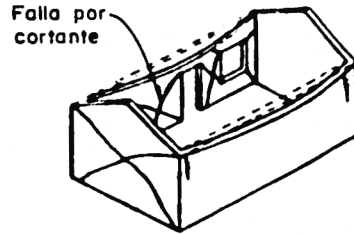
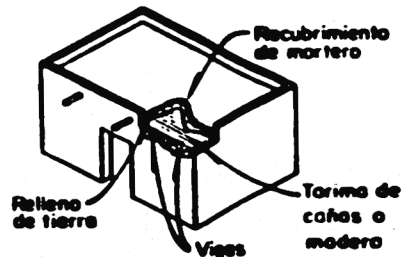
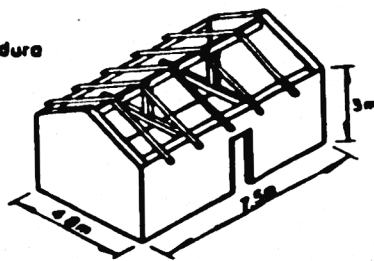
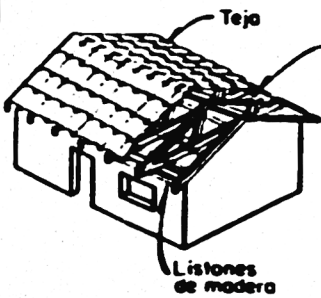


Fig 5 Fallas por cortante en los muros (ref 8)



a) Armaduras de madera

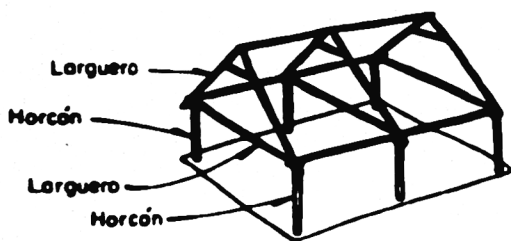
b) Vigas y puntales

c) Vigas de madera con terrado

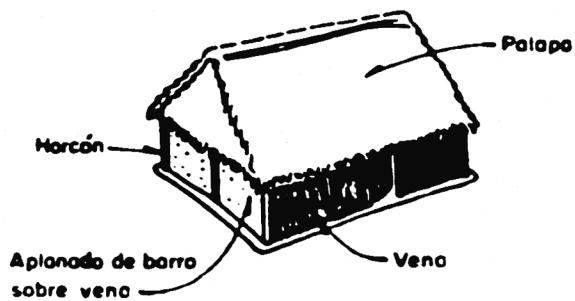
Fig 6 Tipos comunes de vivienda de adobe (ref 8)



Fig 7 Falla local por empuje de las vigas en muros de piedra y lodo



a) Estructura de madera para cubierta con teja



b) Elementos constitutivos

Fig 8 Vivienda de bajareque (ref 9)



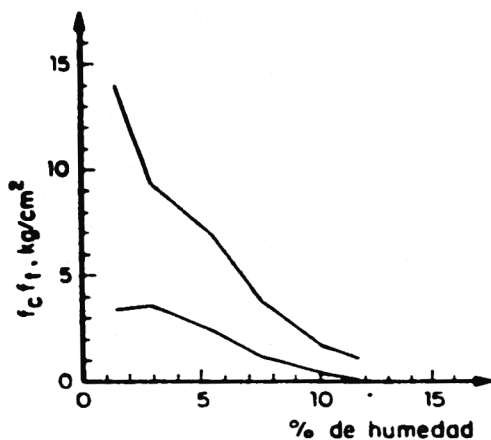


Fig 9 Variación de la resistencia del adobe con el contenido de humedad (ref 3)

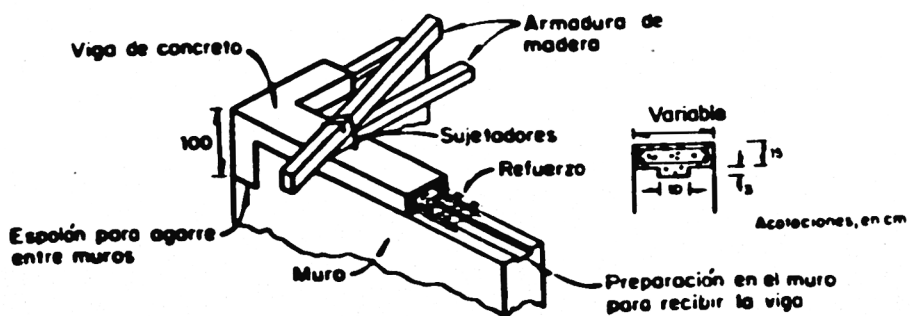
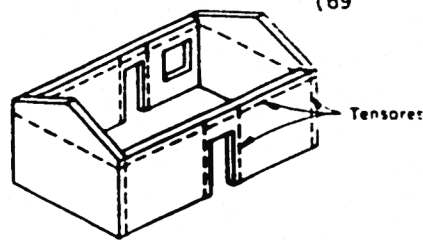
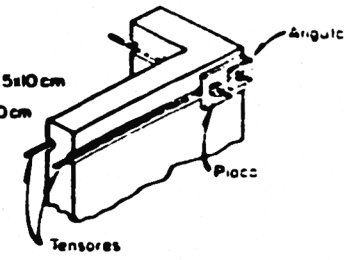
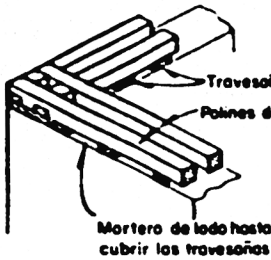


Fig 10 Refuerzo con viga cadena de concreto (ref 3)



12a Tensores horizontales

12b Posible ubicación de tensores horizontales y verticales

Fig 11 Refuerzo con viga de madera

Fig 12 Refuerzo con tirantes de acero

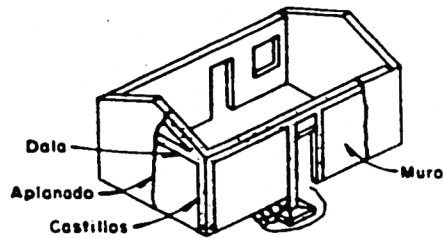
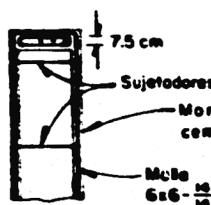
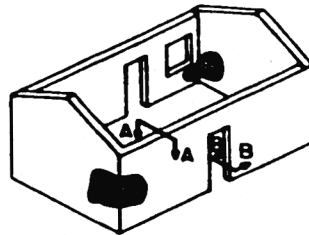
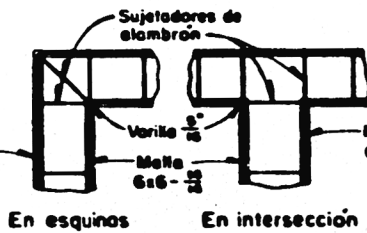


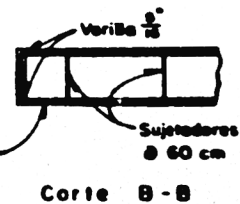
Fig 13 Refuerzo con vigas y columnas de concreto



Corte A-A



Detalles de anclaje del refuerzo en las esquinas



Corte B-B

Fig 14 Recubrimiento de mortero sobre malla (ref 10)

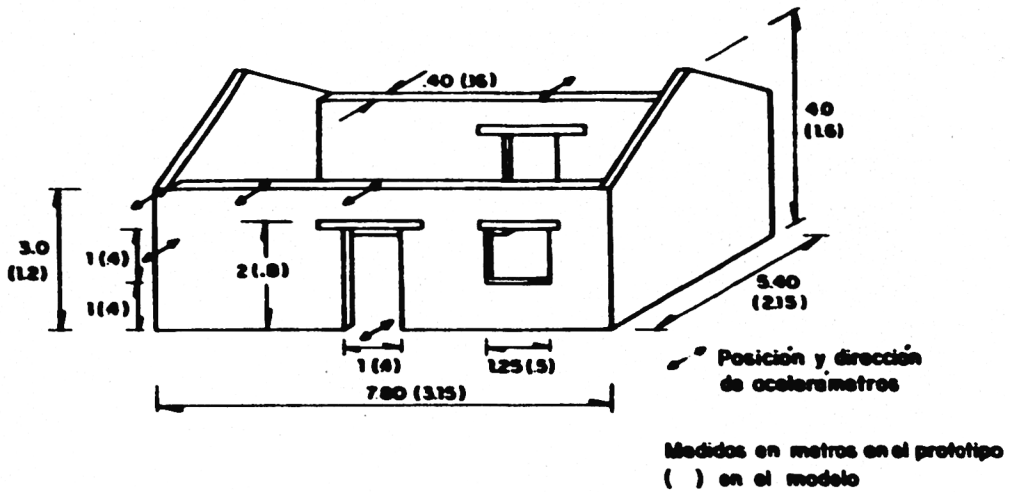


Fig 15 Características de la vivienda de adobe considerada como típica

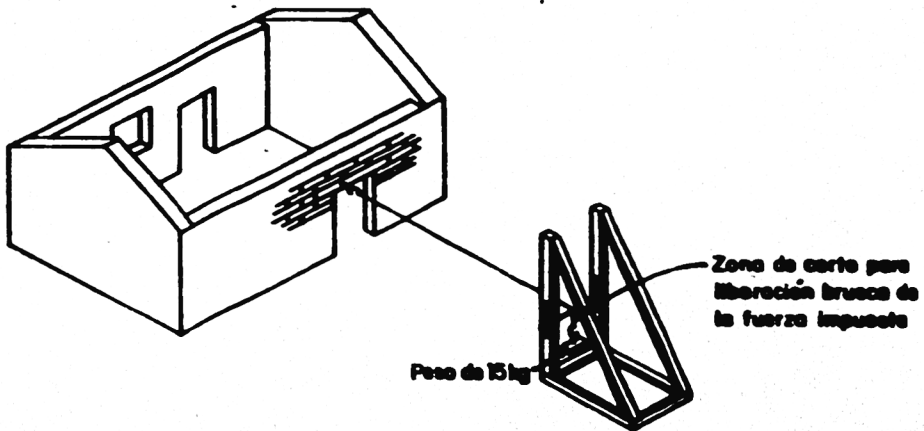


Fig 16 Prueba de vibración libre (ref 9)

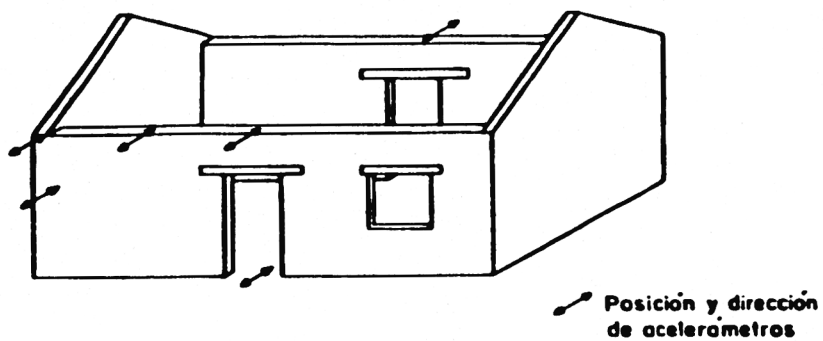
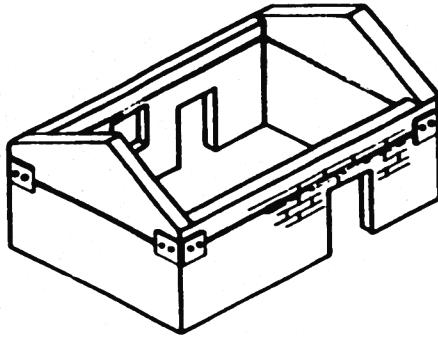
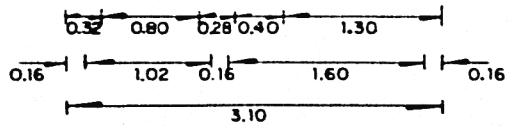
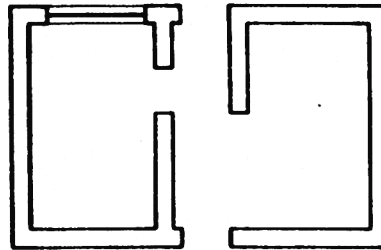
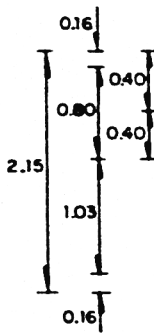
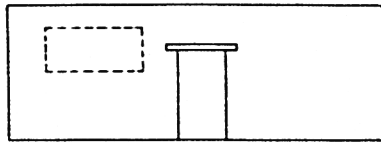
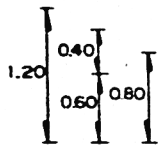
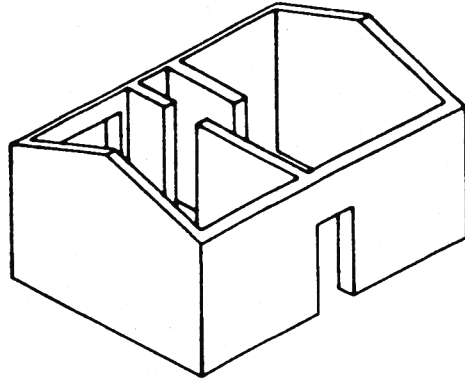


Fig 17 Modelo típico ensayado y distribución de los instrumentos de medición (ref 9)

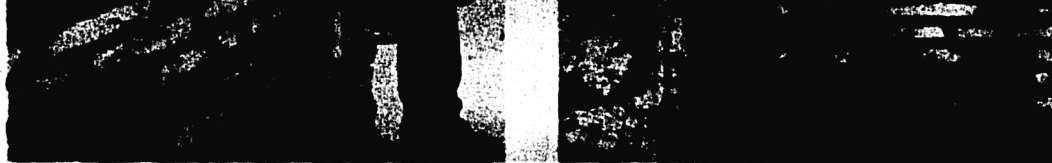


**Fig 18. Ensaye del modelo 5, reforzado con tirantes horizontales (ref 9)**



Acotaciones, en m  
Escala 1: 50

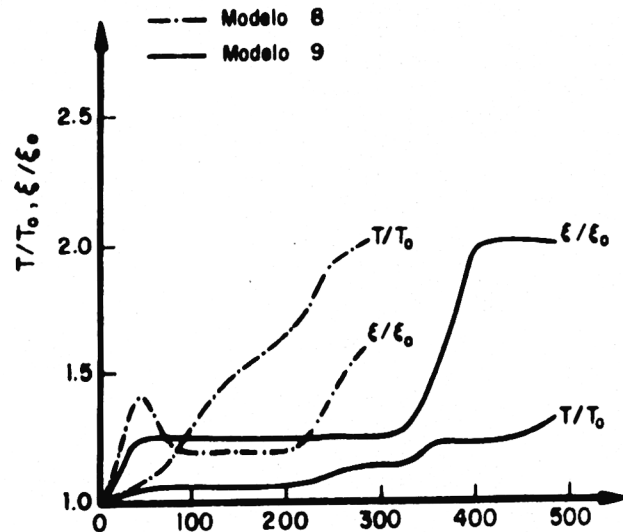
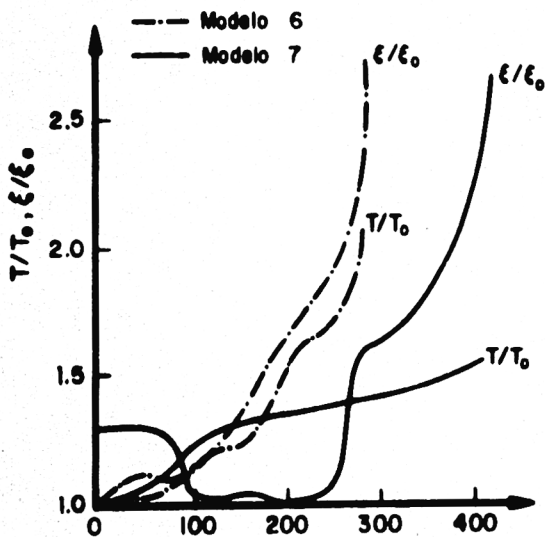
Fig 19. Geometría del modelo 6



**Fig 20. Aspecto del daño en el modelo 6 después de ser reparado**



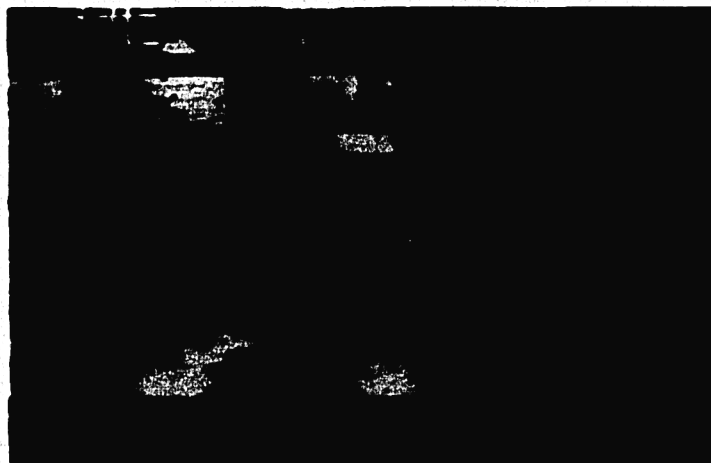
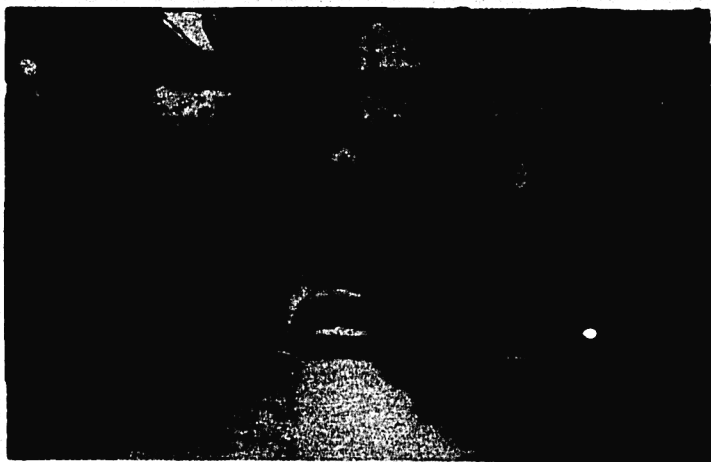
**Fig 21. Procedimiento de refuerzo empleado en el modelo 7**



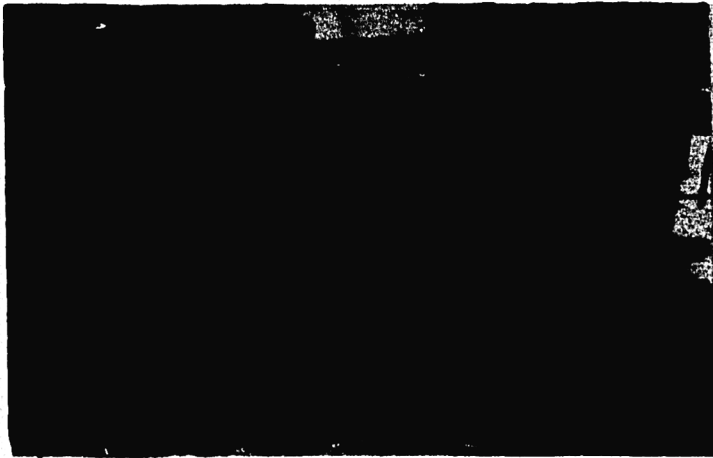
Porcentaje de la intensidad del sismo de Oaxaca

Fig 22 Variación del periodo y del amortiguamiento con el nivel de excitación en los modelos de la segunda etapa





**Fig 23. Estado de dafio de los muros largos del modelo 8 al final de la prueba**



**Fig 24. Estado de daño de los muros cortos del modelo 8 al final de la prueba**



Fig 25. Refuerzo del modelo 9 por medio de tirantes de acero verticales

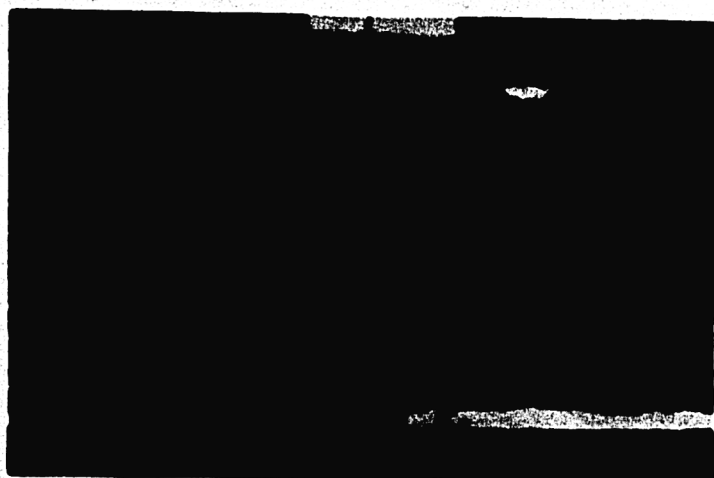
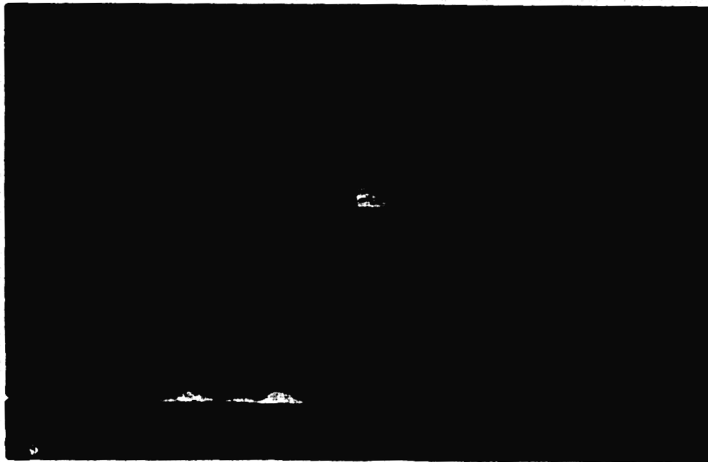


Fig 26. Estado de daño de uno de los muros cortos del modelo 9 al final de la prueba



**Fig 27. Estado de daño de los muros largos del modelo 9 al final de la prueba**

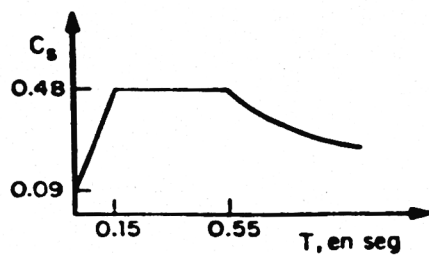


Fig 28 Espectro de diseño (ref 2)

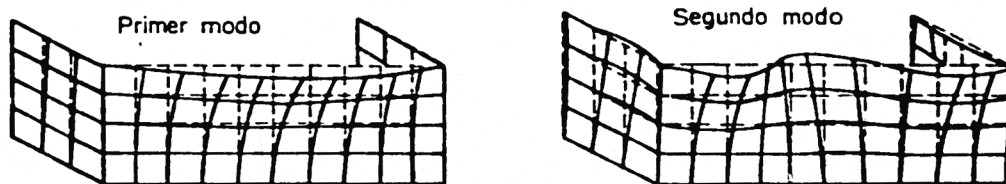


Fig 29 Configuraciones de los dos primeros modos de vibrar (ref 2)

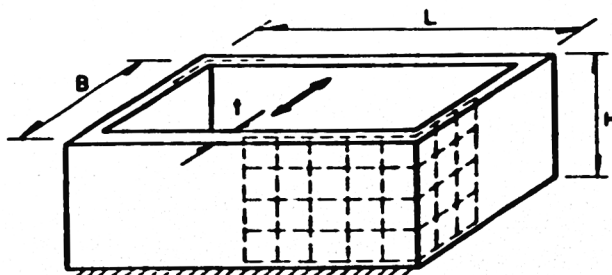
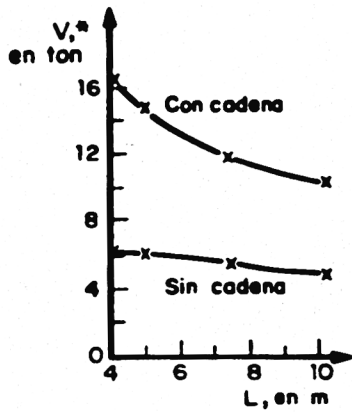
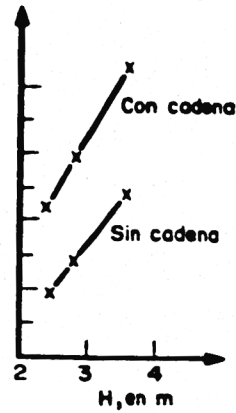


Fig 30 Modelo empleado para el análisis dinámico por elementos finitos (ref 2)

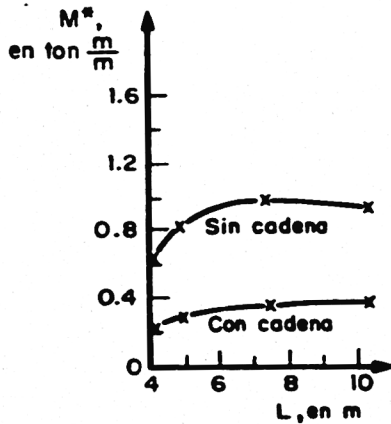


a) Con la longitud

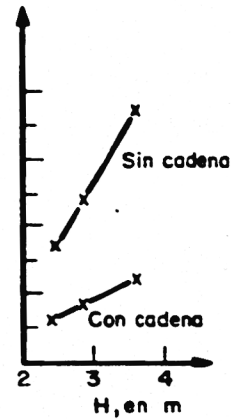


b) Con la altura

Fig 31 Variación del cortante en los muros transversales (ref 2)



a) Con la longitud



b) Con la altura

Fig 32 Variación del momento en las esquinas (ref 2)

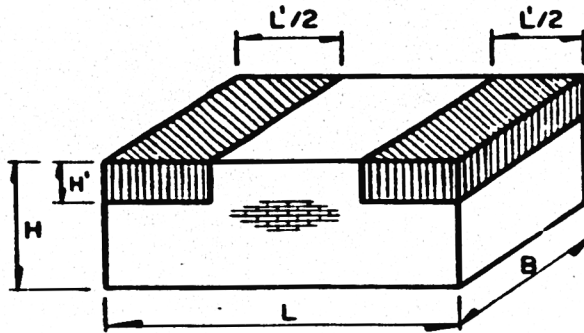


Fig 33. Masa equivalente para calcular el cortante con el método simplificado (ref 2)