

población rural o que puedan ser transferidas a los usuarios con un mínimo de entrenamiento, y respetar los valores estéticos y socioculturales de los habitantes. No se consideró la vivienda de tipo urbano por la gran variedad de alternativas que presenta.

El estudio incluyó el ensaye de nueve modelos; cuatro representaban una vivienda típica sin refuerzo especial y cinco incluían diferentes modalidades de refuerzo. Los ensayes se realizaron para tres movimientos sísmicos, obtenidos de los acelerogramas de los temblores de El Centro, Managua y Oaxaca.

En este trabajo se presenta los resultados del estudio en forma resumida. Una descripción detallada de los mismos puede encontrarse en la ref 14.

2. COMPORTAMIENTO SISMICO DE LA VIVIENDA ECONOMICA

2.1 Comportamiento sísmico y modos de falla

Los movimientos del suelo durante un sismo provocan vibraciones en la estructura, en la cual se generan fuerzas de inercia proporcionales a la masa (peso) de las distintas partes de la construcción, y que son resistidas y transmitidas a la cimentación y al suelo. Los elementos más adecuados para soportar 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. La 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 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.

De no cumplirse la condición de techo rígido en su plano, 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. De esta forma la mayor parte de las fuerzas de inercia son transmitidas a los elementos menos rígidos y aptos para resistirlas.

Las viviendas de mampostería descritas se caracterizan por la escasa densidad de muros, la apreciable altura y longitud sin refuerzo de los mismos y por la poca o nula restricción que el techo proporciona a los extremos superiores de los muros. Todo ello hace que el comportamiento ante sismo esté regido por la flexión de los muros en dirección normal a su plano.

En un estudio teórico realizado en forma paralela al del presente informe (ref 1), se analizó con detalle el comportamiento dinámico de este tipo de construcciones. El modo fundamental de vibración se relaciona con la deformación en flexión de los muros largos; las vibraciones inducen momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los muros (fig 1) los cuales se agrietan progresivamente hacia abajo, por lo que el muro frontal comienza a vibrar como un voladizo, ocurriendo el volteamiento cuando la altura agrietada del muro es suficiente para que la resultante de las fuerzas caiga fuera de la sección del muro. El volteamiento 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 sismos.

En viviendas donde la longitud no soportada de los muros es pequeña o los techos proporcionan restricción a la flexión, o en las de más de un piso, la falla suele ocurrir por cortante a través de grietas diagonales. Este modo de falla frecuentemente se propicia por la existencia de aberturas importantes en los muros (fig 1).

Se han observado indicios 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 aun en sismos moderados, 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.

El comportamiento sísmico de construcciones con muros de piedra natural es similar al de las de adobe, con la agravante de que el peso volumétrico de la piedra es mayor y su resistencia a la tensión y cortante es generalmente menor por debilidad del mortero con que se unen las piedras y porque estas presentan cantos redondeados que no permiten una adherencia adecuada con el mortero. Además de los principales modos de falla 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 local del muro y a la caída parcial del techo (fig 2).

Las construcciones de bajareque, por ser ligeras y flexibles soportan muy bien los sismos 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 pudrición de la parte de los horcones que se encuentra hincada en la tierra. La liga defectuosa de los horcones y los largueros ha sido también causa de daños (ref 2).

En viviendas de un piso de mampostería de tabique recocido se ha observado, durante sismos intensos un comportamiento más favorable que el de las casas de adobe. El número de colapsos ha sido reducido, aunque se han presentado agrietamientos y fallas locales cuando el mortero no era de buena calidad o cuando el número y tamaño de los huecos era grande. La diferencia en comportamiento se debe principalmente al menor peso y altura de estas construcciones y en parte a la mejor calidad del material.

Cuando la mampostería ha sido reforzada con castillos y dadas, el comportamiento ha sido satisfactorio excepto cuando existían defectos flagrantes de estructuración.

2.2 Procedimientos de refuerzo

Las soluciones que se han propuesto para reforzar las viviendas de adobe, piedra o tabique son similares debido a que el comportamiento y modos de falla son semejantes.

Es común recomendar como requisito mínimo de refuerzo la colocación de un elemento resistente en el perímetro superior de los muros, para que los una y les dé continuidad, les proporcione cierta resistencia a flexión normal al plano del muro y permita fijar adecuadamente el techo a los muros. El elemento de refuerzo es en general una cadena de concreto, o un elemento de madera o de acero. Un problema con este tipo de refuerzo es el de lograr una liga adecuada entre el elemento de refuerzo y el muro de adobe; otros son la necesidad de remover parcial o totalmente el techo para efectuar el refuerzo, y la posibilidad de dañar los muros durante la colocación de la cadena.

Un ejemplo de solución de este tipo se presenta en la ref 3, el cual se ha empleado en algunas viviendas dañadas por los sismos de Chiapa de Corzo (1975); se trata de una cadena de concreto perimetral con una costilla que penetra en una muesca abierta en los muros de adobe. En las esquinas se proporcionan espolones que penetran en los muros. Con estas precauciones se trata de anclar la cadena a los muros; dicha solución se muestra en la fig 3 y se complementa con recomendaciones para la rigidización y liga de los techos. Algunos ensayos de vibración forzada de viviendas reparadas de esa manera, tienden a demostrar que la liga entre la cadena y el adobe es efectiva y que se pueden imponer aceleraciones horizontales relativamente importantes sin provocar fallas (ref 4).

Otra solución del mismo tipo propuesta en Chile (ref 5), consiste en una viga de madera de alma abierta, en forma de escalera (fig 4). Los elementos transversales de la viga se recubren con una capa de barro para unirlos al muro; en las esquinas, las vigas transversales se conectan mediante ensambles a media madera. Los elementos de techo se ligan con estas vigas de madera. El refuerzo de los muros mediante tensores de acero lo propuso originalmente Ambraseys (ref 6); recientemente (ref 7), a raíz de los temblores de Skopje (1963) y de Friuli (1975), se ha recomendado una solución semejante para el refuerzo de construcciones de piedra; la solución se muestra en la fig 5 y consta de dos barras de acero alojadas en pequeñas ranuras preparadas en las dos caras de cada muro. Estas barras se cruzan en las esquinas con las del muro transversal y se someten a una ligera tensión inicial

mediante tuercas; la fuerza de los tensores se trasmite a los muros a través de placas de acero o madera. Los tensores cumplen la función primordial de ligar los muros entre sí y a proporcionar resistencia en flexión en la parte superior de los muros. En la solución propuesta en la ref 7, el refuerzo con tensores va asociado a la inyección en las juntas entre las piedras de un mortero con consistencia de lechada, el cual da mayor integridad y resistencia a los muros.

Un refuerzo más efectivo se obtiene si esta solución se complementa con tensores verticales, también ligeramente postensados, en las esquinas y en extremos de grandes huecos (fig 5b). Estos tensores tienen la función de tomar las tensiones debidas a momentos flexionantes en el plano del muro y a las concentraciones de esfuerzos en los extremos de los huecos. También incrementan la resistencia en cortante de los muros por los esfuerzos de compresión generados por el postensado; sin embargo, la colocación de los tensores verticales es mucho más laboriosa que la de los horizontales: para anclarlos en la parte inferior del muro se requiere perforar la cimentación: en caso de que no exista una cimentación sólida, es necesario colar una base de concreto.

Los procedimientos que buscan una mejora 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 6). Se trata de una extrapolación del procedimiento de refuerzo comúnmente empleado para mampostería de tabique o bloque reforzada con castillos y dalas y cuya eficiencia ha sido ampliamente comprobada. Sin embargo, para construcciones de adobe, debido a las dimensiones de los muros, estos elementos de concreto resultan muy robustos y hacen que la solución resulte complicada y costosa. Es problemático lograr una liga adecuada entre el adobe y los elementos de concreto; el adobe sufre cambios volumétricos importantes por variaciones de humedad, lo cual provoca que se vaya despegando de la estructura de concreto. Se han observado algunos casos de volteamiento de muros enmarcados por elementos de concreto que por estar despegados no ofrecieron al muro ninguna restricción al movimiento normal a su plano. 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 (ref 8).

Los autores del presente estudio propusieron, con miras a reforzar las viviendas afectadas por el sismo de Chiapa de Corzo, un procedimiento que consiste en colocar mallas de refuerzo que envuelven totalmente los muros de adobe y que van recubiertas por una capa de mortero (ref 9). Anclando cuidadosamente la malla al adobe, se logra una sección compuesta en que el adobe funciona como alma para tomar los esfuerzos cortantes, y el aplanado reforzado con malla constituye los patines que toman los esfuerzos de tensión y compresión debidos a la flexión normal al plano del muro. La malla es además un refuerzo por cortante que mantiene la resistencia del muro, en caso de que se exceda la capacidad del adobe y este se agriete diagonalmente. Con las mismas mallas y algunas barras adicionales se forman elementos verticales y horizontales en los bordes de los huecos y en los extremos del muro; en las esquinas, la continuidad de las mallas proporciona liga entre los muros. El trabajo conjunto del adobe y las capas de refuerzo se obtiene mediante sujetadores de alambre, espaciados cada 60 cm, que amarran las mallas de refuerzo en las dos caras del muro. Se considera que el sistema proporciona continuidad entre los muros, mayor rigidez y resistencia en flexión.

La capacidad del sistema se puede determinar con procedimientos sencillos de resistencia de materiales. La fig 7 muestra algunas características del procedimiento. El recubrimiento de mortero proporciona a la vivienda una protección contra el intemperismo, evitando los frecuentes problemas de deterioro.

Otra forma de mejorar la seguridad de las construcciones es mediante modificaciones que reduzcan las fuerzas que las afectarían en caso de un sismo; por ejemplo, la disminución del peso del techo a través de emplear 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 considerablemente 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. Es evidente que las distintas alternativas propuestas difieren mucho en cuanto a los aspectos mencionados. Una evaluación preliminar de ellas se intentará al final del trabajo, tomando en cuenta los resultados experimentales.

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 dijo, el comportamiento sísmico de estas construcciones es excelente cuando los materiales no están intemperizados. La ref 2 recomienda impermeabilizar los morillos con asfalto e hincarlos en una base de concreto o mampostería, sustituir la liga de los elementos mediante un simple amarre con cordeles, por una unión rígida clavada, tratar el techo de palapa para hacerlo más durable o sustituirlo por teja, y resanar periódicamente el aplanado de lodo.

3. PRUEBAS DINAMICAS EN MESA VIBRATORIA

3.1 Planteamiento

Las características peculiares de las construcciones de adobe dificultan el estudio del comportamiento ante cargas laterales mediante ensayos sencillos, principalmente por la dificultad de aplicar cargas a los especímenes sin que se produzcan fallas locales en los puntos en que se concentran las cargas. Un ensayo sencillo y representativo consiste en colocar el modelo en una plataforma cuya inclinación puede variarse gradualmente (ref 10). Una manera más elaborada es por ensayos en mesa vibratoria.

El Instituto de Ingeniería cuenta con una mesa vibratoria de 2.4 x 4.5 m con capacidad para modelos hasta de 15 ton y aplicar movimientos en la dirección longitudinal de la mesa que reproduzcan con fidelidad acelerogramas medidos o simulados. El desplazamiento máximo de la mesa es de ± 2.54 cm.

Se estudió, mediante ensayos, el comportamiento dinámico de la vivienda

de la fig 8, la cual, es típica del medio rural. El tamaño de la mesa vibratoria obliga a reproducir una porción de la vivienda o a ensayar un modelo a escala reducida. Se eligió la segunda opción y se construyó un modelo con una escala geométrica 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 (fig 9). Existen dos formas de cumplir dichas condiciones: la primera (alternativa 1, fig 9) requiere que los pesos volumétricos de los materiales que forman el modelo sean superiores a los del prototipo en una vez la escala de dimensiones; la otra (alternativa 2) requiere que la resistencia ante todos los posibles modos de falla sea inferior en el modelo en una vez el factor de escala. Con ambas condiciones, y alterando adecuadamente la escala de tiempos y aceleraciones del movimiento sísmico, se puede relacionar directamente la respuesta dinámica del modelo y del prototipo, y reproducir los modos de falla.

Cumplir con cualquiera de las dos condiciones es, sin embargo, problemático: para la alternativa 1 sería difícil y costoso fabricar un material que tuviera 2.5 veces el peso volumétrico del adobe y conservara la misma resistencia y módulo de elasticidad. Una forma aproximada para cumplir con esta condición es colocar masas distribuidas de manera uniforme en el modelo, de manera que la masa total se incremente en la relación deseada, y los esfuerzos no se vean afectados localmente. En estructuras en las que las masas están concentradas en los pisos y techos, es fácil cumplir la condición con sobrecargas colocadas en los distintos niveles. En el modelo que se quiere estudiar, la masa principal es la de los muros y deberían colocarse pesos a distintas alturas del muro. La magnitud de las cargas necesarias es tan alta que se consideró difícil hacerlo sin afectar los muros. En la alternativa 2, aunque es factible obtener un material con una resistencia en tensión 2.5 veces menor que la del adobe, es poco probable que se pueda disminuir en la misma proporción la resistencia en compresión, adherencia en las juntas, fricción y módulo de elasticidad.

Si no se modifican ni la densidad del material ni las resistencias se puede, aun así, reproducir exactamente el comportamiento y esfuerzos dinámicos en el modelo si se siguen las relaciones establecidas en la alternativa