

estudiaron nueve modelos, de los cuales cinco fueron construidos en forma independiente, tres sin refuerzo, uno con cadena de concreto y otro con muros interiores; los modelos restantes se obtuvieron reforzando los tres previamente ensayados sin refuerzo alguno y el que tenía muros interiores, y que habían sido llevados a un estado de daño muy avanzado; uno se reforzó con malla, otro con tirantes horizontales, uno más con tirantes verticales y horizontales; el modelo de tabicón cemento-arena se reparó con una dala de concreto y tirantes verticales.

Algunos ensayos en los primeros modelos se realizaron colocando peso adicional para reproducir parcialmente el efecto del peso propio de los muros en los esfuerzos verticales (alternativa 4 en el análisis dimensional); en los restantes no se consideró este efecto por ser la condición más desfavorable (alternativa 3).

El procedimiento de ensaye consistía en someter cada modelo a movimientos que representaran el sismo elegido, con las amplitudes reducidas por diferentes factores. La amplitud se aumentaba progresivamente hasta llegar al estado de daño considerado como máximo. La fig 14 muestra los espectros de los movimientos correspondientes al sismo de El Centro para distintos niveles de intensidad. Se observa que la proporcionalidad entre los espectros correspondientes a las diferentes intensidades es muy aceptable, especialmente para periodos largos. Antes de cada prueba se realizaba un ensaye de vibración libre en el que una de las paredes de mayor longitud se sometía a una fuerza horizontal en el centro de su extremo superior (fig 15) y se soltaba bruscamente, registrando la variación de las aceleraciones en los distintos puntos instrumentados. De las mediciones se calcularon el periodo natural de vibración y el amortiguamiento, tabla 5. Estos parámetros se consideran como un índice cuantitativo del nivel de daño sufrido por el espécimen.

En cada modelo se colocaron seis acelerómetros (fig 15); el de 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

a fin de verificar que no hubiera movimientos transversales significativos. Los acelerómetros en las paredes determinaban la variación de las aceleraciones con la altura del muro y con la distancia de las esquinas, así como verificar si las distintas paredes vibraban en fase o no.

3.4 Análisis e interpretación de resultados

Debido a las limitaciones de los ensayos, provenientes tanto de las características del equipo 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 cuantitativamente al prototipo; el movimiento aplicado a la mesa fue en una sola dirección, por tanto, no se reprodujo 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 filtrar los movimientos de periodos largos del sismo, los cuales son importantes cerca del colapso cuando la construcción o parte de ella han perdido bastante de su rigidez; por otra parte, los modelos no estuvieron expuestos al intemperismo, que altera en forma no despreciable las propiedades de los prototipos y los vuelve más vulnerables. Finalmente, no se pudieron reproducir fielmente los esfuerzos debidos a peso propio pero, como se mencionó, 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 falla al prototipo. 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 diferentes tipos de refuerzo.

Una primera interpretación cuantitativa de los resultados la ofrece la posibilidad de comparar los periodos 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 (fig 8), la construcción ensayada tiene dos ejes de simetría y se puede, por tanto, realizar el análisis considerando solo una cuarta parte de ella. 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 periodo natural de vibración de 0.09 s para la casa sin refuerzo, y de 0.07 s para la reforzada con cadena. Los periodos obtenidos a partir del modelo físico fueron 0.079 y 0.067 s, respectivamente.

Además, los acelerómetros colocados en diversos puntos de los modelos permiten obtener la distribución de aceleraciones en la construcción y relacionarla con la aceleración medida en la base. Esta distribución se puede comparar con la que corresponde a un análisis espectral realizado con los modos de vibración obtenidos del análisis teórico. La tabla 3 es un resumen de los valores obtenidos teórica y experimentalmente para los modelos 1 y 2 (sin refuerzo y con cadena).

La aceptable concordancia observada entre los periodos 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 cuantitativamente es el de la variación del periodo fundamental y del amortiguamiento obtenidos de las pruebas de vibración libre, a medida que el modelo había sido sometido a intensidades sísmicas crecientes (fig 16). El aumento del periodo 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.

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 propiedades dinámicas de los modelos mencionadas, se puede suponer que si el periodo se incrementa menos de 10 por ciento, y el aumento del amortiguamiento no rebasa 20 por ciento respecto a los valores iniciales, la estructura se puede considerar aun en buen estado, y el nivel de daño es mínimo. Si se tienen incrementos entre 10 y 20 por ciento en el periodo y entre 20 y 50 por ciento 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 a aparecer grietas por cortante, los incrementos en el periodo y amortiguamiento estarán por debajo de 50 y 100 por ciento, 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. En general, puede 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 50 por ciento de la intensidad del sismo de El Centro, y que con 90 por ciento del mismo llegó prácticamente a la falla. El segundo modelo, gracias al refuerzo de la viga cadena, soportó sin daño aparente movimientos equivalentes a 90 por ciento 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 más intenso que 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 instrumentalmente se determinaron menores que los del modelo anterior, y con 450 por ciento 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.

En el modelo 4, a diferencia de los otros cuatro, el periodo 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 fue 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 aquel con el de El Centro.

El refuerzo con 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 destacar 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. La 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 225 por ciento la del sismo de Oaxaca, pero desde niveles del orden de 90 por ciento aparecieron las grietas de cortante entre los huecos.

En cuanto al modelo 6, se puede decir que los muros interiores proporcionaron cierta rigidez adicional que se tradujo en una intensidad de falla 50 por ciento mayor con 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 perdió para intensidades del orden de 150 por ciento de la del sismo real.

El modelo 7 permitió evaluar la eficiencia del uso combinado de tirantes horizontales en la periferia de los mismos y de tirantes verticales tanto en las esquinas como a ambos lados de huecos de puertas y ventanas. El ensaye del modelo demostró la contribución considerable que proporcionaron los tirantes verticales, incrementando la intensidad de falla en 40 por ciento 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 muy elevadas porque, inclusive para intensidades de 350 por ciento que las del sismo real, los diferentes muros vibran en fase.

En el modelo 8 se introdujo un cambio importante: se construyó el modelo con tabicón de cemento y arena, usando en las juntas un mortero muy pobre (cal y arena). Resultó de gran interés que los principales daños al modelo se presentaron en los muros cortos por efectos de la fuerza cortante; además, 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 agrietamiento en el muro largo con puerta y ventana que se presentó en el modelo 8 para intensidades 20 por ciento mayores que el sismo real, en el modelo 9 ocurrió para una intensidad 3.6 veces mayor. El estado de falla que se presentó en los muros cortos del modelo 8 ante una intensidad de 240 por ciento mayor que la del sismo real no se igualó en el modelo 9, sino hasta que este fue sometido al doble de dicha intensidad (480 por ciento).

Los registros obtenidos durante las pruebas de vibración libre revelaron un incremento gradual y pequeño en el periodo de vibración (fig 15), el cual al final del ensaye resultó apenas 29 por ciento 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 por ciento en dicho índice correspondió a una intensidad de 380 por ciento que la del sismo real.

En la tabla 4 se muestra la relación entre la intensidad inducida a los modelos sin refuerzo y la de los reforzados para cuando las estructuras se consideraron como sin daño y colapsadas según el criterio establecido en párrafos anteriores. Esta tabla permite realizar comparaciones acerca de la eficiencia para aumentar la resistencia de los distintos procedimientos de refuerzo ante fuerzas de origen sísmico. Se puede ver que el sistema más eficiente es el de la malla por ambas caras del muro, le sigue el de la cadena perimetral con tensores verticales; de menor eficiencia resultan los tensores verticales y horizontales junto con el sistema que emplea únicamente la dala perimetral de concreto. Los procedimientos que resultaron menos eficientes, pero que aumentaron considerablemente la resistencia de los modelos, fueron los muros interiores para reducir la longitud de los muros largos, y los tensores horizontales en la parte superior de los muros.

4. CONCLUSIONES

Las deficiencias de las viviendas de adobe y en general de las de mampostería no reforzada, en lo que se refiere a su resistencia ante sismos, están claramente identificadas; esto permite establecer recomendaciones concretas para subsanar defectos.

Debe distinguirse el problema de las nuevas construcciones del de la seguridad de las viviendas existentes. Se considera en términos generales que las precauciones para construir una vivienda de adobe adecuadamente sísmo-resistente y duradera exceden al costo de una construcción de muros de tabique o de bloque confinados con dalas y castillos. Para este último tipo de construcción existen criterios y normas establecidas con los que se logra una seguridad ante sismo. El problema crítico es la situación del gran número de viviendas de adobe existentes en zonas sísmicas para las que deben establecerse procedimientos para incrementar su seguridad dentro del alcance de los habitantes.

De los estudios realizados se desprende que el procedimiento de refuerzo más eficaz consiste en 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; su inconveniente es el relativo costo de los materiales.

Un procedimiento con una eficiencia menor, aunque 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 este trabajo mostraron su capacidad para mantener unidos los muros aun ante intensidades sísmicas elevadas. Sin embargo, el nivel de daño es muy alto y conviene considerar un arreglo de tirantes más completo, incluyendo refuerzo vertical en los huecos y en las esquinas.

El refuerzo con viga cadena en el extremo superior fue más eficaz que los tirantes horizontales e igualmente efectivo que el de tirantes horizontales y verticales, aunque no impidió un daño importante en las esquinas de los muros, en las que se requeriría un refuerzo vertical adicional. Este procedimiento tiene la desventaja de requerir el soporte o la remoción total o parcial del techo para su colocación.

Se han analizado aquí únicamente los aspectos esenciales de los procedimientos de refuerzo; existen detalles adicionales que es necesario cuidar para un buen comportamiento sísmico como son la rigidización del techo en su plano para que forme un diafragma, la adecuada liga del techo a los muros, el refuerzo local en los huecos, y la fijación de las tejas para evitar su deslizamiento.

Con respecto a los ensayos en mesa vibratoria puede concluirse que, aun reconociendo las limitaciones propias de la reproducción 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.