

Reparación de daños Estructurales en elementos de Mampostería

Oscar Hernández *

INTRODUCCION

Dada la gran actividad sísmica que se presenta en México, es de gran importancia conocer el efecto de los sismos sobre las estructuras, los daños que les producen y la forma de lograr que las estructuras dañadas recuperen o superen sus características de resistencia y capacidad de deformación.

Al examinar los daños que ocasiona un sismo se encuentra que en general estos pueden ser de dos tipos: estructurales y no estructurales; estos últimos, como agrietamientos de muros de relleno y caída de acabados, son arreglados en forma rápida, aunque en ocasiones a costos elevados.

Los daños estructurales requieren reparaciones más completas que las otras; en este caso es necesario rehabilitar la estructura tomando en cuenta diversos aspectos, cuyo análisis y descripción constituyen el objetivo del presente trabajo. Entre tales aspectos están la identificación de las fallas que se producen en estructuras convencionales y las causas que las originan, la descripción de métodos para evitarlas y los procedimientos para reparar y reforzar elementos estructurales y estructuras completas. La presentación se limita para estructuras de mampostería.

EVALUACION DEL DAÑO EN ESTRUCTURAS

Aspectos generales. A pesar de los avances de la ingeniería sísmica, en opinión de muchos investigadores y profesionistas, el diseño y construcción de estructuras resistentes a sismos es parte de un arte y parte ciencia. Un hecho que ha mejorado el juicio de los ingenieros ha sido el observar el comportamiento, bueno o malo, de las estructuras después de que ha ocurrido un sismo; esto ha proporcionado invaluable ayuda para mejorar los códigos y métodos de análisis y dimensionamiento.

Entre los problemas de la ingeniería estructural que constituyen un reto está el definir qué acción debe tomarse cuando una estructura es dañada por un sismo, ya que se tiene que decidir si es susceptible de repararse o si debe ser demolida.

En principio, cualquier estructura dañada que permanece en pie es reparable, pero influirán en la decisión de hacerlo aspectos de tipo económico, social y, en algunas circunstancias, aspectos políticos.

La reparación y refuerzo de estructuras es una actividad a la que sólo eventualmente se le ha dado importancia, generalmente después de que ha ocurrido un sismo; en algunos países se legisla acerca de la necesidad de que las estructuras

* Investigador, Depto. de Ingeniería Civil, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Profesor, División de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM.

con varios años de uso cumplan con los nuevos códigos de diseño, forzando incluso a reforzar las mismas aun cuando no hayan tenido daños durante temblores previos.

Después de la ocurrencia de un sismo se vero, generalmente se procede a hacer una evaluación superficial de los daños y a la reparación de la estructura; en la mayoría de los casos esta reparación consiste en la remoción y sustitución del material dañado, sin realizar estudios acerca de la conveniencia de reestructurar la construcción, dejándola en condiciones precarias ante otro sismo. Por lo anterior es necesario que se forme mayor conciencia de lo peligroso y anti-económico que resulta proceder en esta manera, y que es necesario entender mejor el por qué de las fallas, la manera de evitarlas y, en su caso, la forma de proceder a reparar el daño.

Procedimiento para evaluar el daño. El problema radica en establecer la magnitud del daño en la estructura y decidir si esta debe demolerse o repararse, y en este último caso, recomendar la forma de reparación adecuada.

Para tomar esta decisión es necesario que el ingeniero haga uso de sus conocimientos y experiencia en la forma más razonada posible, aún cuando dispone de poco tiempo para hacerlos, porque por motivos económicos y sociales las estructuras tienen que volver a su uso a la brevedad posible.

El problema de diagnóstico y evaluación de los daños consiste en determinar la resistencia de la estructura en una situación dada y revisar si tiene un fac-

tor de seguridad adecuado; es decir, si la relación entre su resistencia y la intensidad de las cargas que puedan afectarla es suficientemente grande para cubrir con seguridad la posibilidad de un eventual colapso ante sismos futuros. Para esto, la primera acción a tomar es realizar una inspección detallada de la estructura para localizar los daños estructurales y no estructurales existentes, especificar el tipo de daño y elaborar planos con la información que al respecto se recabe; esto es indispensable para tener una visión de conjunto del comportamiento que tuvo la estructura, con el fin de establecer las causas de los daños.

En paralelo, es indispensable analizar los planos estructurales y arquitectónicos de la estructura en su concepción original, con el propósito de determinar su estructuración, dimensiones y refuerto de los elementos estructurales, localización de elementos no estructurales, propiedades de los materiales, etc., así como también las magnitudes de las cargas vivas y muertas de diseño. Cuando no se cuenta con los planos mencionados (situación muy frecuente), se debe llevar a cabo un levantamiento físico para recabar los datos necesarios incluyendo calas para determinar cantidades de refuerzo existente, así como obtención de muestras de concreto, mampostería y acero de refuerzo para pruebas de laboratorio.

Con lo anterior, se procede al análisis de la estructura en condiciones originales (antes del daño) bajo cargas verticales y horizontales, con el fin de comparar los elementos mecánicos resultantes con los daños observados y registra

dos en el levantamiento previo y llegar a conclusiones sobre la posible causa de los mismos; si el defecto no es grave y los daños no son de gran magnitud, éstos pueden repararse localmente. Si el defecto es grave y los daños son numerosos y de consideración, la estructura es insegura y se procede a rediseñarla a la brevedad posible; es peligroso dejarla tal como está, efectuando únicamente reparaciones locales, porque se presentarían daños ante otro movimiento sísmico, posiblemente con mayores consecuencias.

Para este propósito y tomando en cuenta las causas de la falla, hay que procurar un mejor comportamiento de la estructura. Si tenía una excesiva flexibilidad, deben incluirse suficientes elementos resistentes a cargas laterales, distribuidos en forma más o menos uniforme y simétrica para no introducir excentricidades indeseables.

Con la nueva estructuración y secciones propuestas debe efectuarse otro análisis para dimensionar los miembros estructurales adicionales y, si resulta necesario, proceder al refuerzo de los ya existentes.

Finalmente, viene otro aspecto que es difícil de determinar: la eficiencia de la reparación, refuerzo o reestructuración. La manera más conveniente de verificar lo anterior es mediante pruebas ante cargas, tanto verticales como laterales; desafortunadamente en muchos casos no se cuenta con el sistema para proporcionar cargas laterales de la magnitud deseada, quedando entonces la duda acerca de la eficiencia de los procedimientos utilizados para restaurar o

aumentar la resistencia y rigidez.

Una manera de lograr una idea burda acerca de la rigidez es midiendo el periodo de vibración de la estructura para oscilaciones pequeñas; si este periodo disminuye quiere decir, si no se ha incrementado la masa, que se ha aumentado la rigidez lateral de la estructura.

Por lo comentado y por las incertidumbres que se tienen durante el proceso de rediseño debe buscarse que se tenga un alto margen de seguridad entre la resistencia calculada y la necesaria según los nuevos análisis.

DAÑOS MAS COMUNES EN ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA

En esta sección se señalan los daños más comunes que presentan distintos tipos de construcciones de mampostería, las causas que los originan y la manera de evitarlos. La forma de reparar esos daños se verá en detalle más adelante, donde se describirán distintos procedimientos que se han estudiado en México.

Mampostería de adobe. El adobe es el material más empleado para los muros en la vivienda rural en México y muchas otras partes del mundo. Las viviendas más comunes se caracterizan por un cuerpo principal de un solo piso, planta rectangular alargada de 30 a 50 m² de área, muros de 3 a 3.5 m de altura con espesores de 40 a 60 cm sin refuerzo, frecuentemente sin muros divisorios, y escasa restricción de la parte superior de los mismos. Todo ello hace que el comportamiento esté regido por la flexión de los muros en direc-

ción normal a su plano.

En la fig 1a se muestran los sistemas de techos más comunes, y en la fig 1b los tipos de falla características de estas viviendas.

Al vibrar los muros durante un sismo, se inducen momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los mismos, los cuales se agrietan progresivamente hacia abajo, de manera que el muro frontal comienza a vibrar como en 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 causa de sismos.

En viviendas en las que la longitud no soportada de muros es pequeña o en las que los techos proporcionan restricción a la flexión, o en las de más de un piso, la falla suele ocurrir por cortante en forma de grietas diagonales. Este modo de falla es propiciado con frecuencia por la existencia de aberturas importantes en los muros.

Se ha observado que el colapso se inicia 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 deslizamiento de los elementos del techo sobre los muros, a los que están fijados en forma muy precaria.

Son diversas las soluciones que se han propuesto en la literatura para evitar

el daño en viviendas de adobe. Como recomendaciones generales para mejorar el comportamiento sísmico de estas construcciones se pueden mencionar:

1. Hacer una selección cuidadosa de los suelos con que se fabrica el adobe y su mejoramiento con fibras o con aditivos estabilizadores.
2. Reducir la altura de los muros al mínimo admisible para la habitabilidad de la vivienda.
3. Subdividir los espacios interiores mediante muros ligados entre sí con el mejor cuatrapeo posible de las piezas.
4. Evitar techos pesados y estructurar éstos para que tengan rigidez en su plano y estén apropiadamente ligados a los mismos.

Si se siguieran las recomendaciones anteriores, se aliviarían algunos inconvenientes como son la escasa resistencia en tensión del adobe y la poca adherencia que se logra en las juntas con los morteros de lodo. Sin embargo, aún con adobes de buena calidad, no puede lograrse una buena liga entre los muros transversales, por lo que es probable que los muros fallen por el efecto de fuerzas normales a su plano, ya sea por volteamiento o por fallas locales debidas a los empujes de los elementos de techo. En muchas ocasiones las fallas de estas construcciones aumentan porque el adobe se encuentra muy debilitado por efecto del intemperismo. En consecuencia, una mejora importante en el comportamiento sísmico sólo puede obtenerse por medio de algún refuerzo en el

adobe que proporcione una liga adecuada entre los elementos y cierto confinamiento y capacidad de deformación a los muros. La manera como esto puede lograrse se verá más adelante.

Elementos de mampostería de piedras artificiales. Existen diferentes modalidades para construir muros de mampostería, desde la no reforzada hasta las más conocidas como son la mampostería confinada y la mampostería con refuerzo interior.

Las mamposterías de tabique y bloque sin refuerzo han tenido un comportamiento deficiente ante el efecto de sísmo o de movimientos de las cimentaciones porque adolecen de dos defectos graves: la liga que se logra entre muros transversales por el simple cuatrapeo de las piezas, no es suficiente para impedir el volteamiento de los muros ante empujes en su plano, y la falta de confinamiento y refuerzo propicia una falla frágil por el efecto de las cargas en el plano del muro. Su comportamiento sísmico es similar al de las construcciones de adobe.

El comportamiento sísmico de construcciones cuyos muros están confinados con dalas y castillos ha sido definitivamente mejor que el de la mampostería no reforzada. Al estar rodeados por un elemento perimetral de concreto, los muros tienen una capacidad de deformación mucho mayor y no fallan bruscamente al agrietarse. Los elementos confinantes permiten realizar, además, una liga eficaz de los muros entre sí y de estos con los sistemas de piso.

Hay que notar que a pesar de que con es

te sistema se reduce la probabilidad de un colapso de la construcción, no se evitan los agrietamientos diagonales en los muros, ya que la resistencia en tensión diagonal de la mampostería no se incrementa apreciablemente por la presencia de las dalas y castillos.

Para la mampostería con refuerzo interior, tanto el comportamiento sísmico observado en estructuras reales como los ensayos de muros en el laboratorio indican que, si se coloca únicamente refuerzo vertical muy espaciado y no se proporciona refuerzo horizontal, el comportamiento sísmico es deficiente debido a la falla local de las piezas huecas.

Los daños que puede presentar las mamposterías son principalmente debidas al inadecuado refuerzo o liga con los elementos que los confinan, por las torsiones causadas al estructurar en forma deficiente la construcción, o por la falla del suelo debida a asentamientos diferenciales, momentos de volteo o a la licuación del suelo.

En términos generales, en la mampostería se pueden presentar tres tipos de falla: compresión, flexión y cortante. La primera de ellas raramente llega a ocurrir y por tanto no se hablará más de ella; la falla por flexión se identifica por las grietas horizontales que se abren en un extremo del muro sobre las juntas de mortero situadas en la parte inferior, mientras que en el otro extremo ocurre el aplastamiento de las piezas y/o elemento que confina al muro; ocurre una variante de la falla por flexión caracterizada por grietas verticales en la parte inferior del muro, es

ta se debe básicamente a hundimientos del terreno ocurridos en un lapso considerable de tiempo.

Mucho más frecuente que los dos tipos de falla antes descritos es el debido a fuerzas cortantes producidas ya sea por fuerzas laterales externas (sismo principalmente) o por hundimientos diferenciales del terreno; fácilmente se identifica esta falla porque las grietas diagonales en el muro que pueden seguir dos trayectorias:

- 1) sobre las juntas del mortero, en cuyo caso se dice que existe una falla por cortante y
- 2) sobre piezas y juntas, dando lugar a la denominada falla por tensión diagonal.

En el caso de falla por tensión diagonal prácticamente se puede decir que se ha agotado la resistencia de la mampostería, por lo que el refuerzo de la misma implicará necesariamente el uso de acero estructural o cambiar la mampostería por otra parte más resistente. No es así el caso en que se tiene falla por cortante (por las juntas) en donde, como se verá posteriormente, se pueden utilizar otros procedimientos para aumentar la resistencia ante fuerzas cortantes.

PROCEDIMIENTOS DE REPARACION Y REFUERZO

La filosofía de diseño más aceptada actualmente establece que para sismos de intensidad moderada se deben diseñar las estructuras para que no presenten daños estructurales, aunque tal vez se tengan algunos daños no estructurales si la construcción es muy flexible; y

para el sismo de diseño, la estructura debe quedar en pie aun cuando presente graves daños en sus elementos estructurales. Para sismos de intensidad intermedia la estructura puede presentar algunos daños estructurales debido a malos detalles constructivos, deficiente calidad de los materiales, etc., surgiendo entonces la necesidad de reparar los daños.

Se pueden establecer tres niveles de reparación:

1. Se resanan superficialmente los elementos estructurales. Esto ocurre con frecuencia en construcciones de personas de bajos recursos, o se hace por ignorancia en otros tipos de estructuras; como consecuencia, estas quedan debilitadas para eventos futuros.
2. La estructura se repara para recuperar su resistencia y rigidez original. Esto generalmente se trata de conseguir mediante la reparación local de los miembros dañados; sin embargo, se ha observado que este objetivo casi nunca se alcanza, quedando la estructura susceptible de presentar los mismos daños, o más graves, ante sismos de la misma intensidad.
3. Se rediseña la estructura. A este nivel, además de la reparación local se procede a rediseñar la construcción para asegurar su supervivencia para sismos más intensos que el que produjo el daño.

De las alternativas anteriores, la tercera es la más conveniente, aunque la

segunda es en ocasiones aceptable, sobre todo cuando están muy localizados los daños. La reparación superficial debe evitarse.

Los procedimientos de reparación y refuerzo que actualmente se emplean son empíricos, ya que han sido desarrollados con base en experiencia acumulada. Cuando se procede sólo a reparar localmente debe quedar muy claro el objetivo adecuado a lograr: En la mayoría de las ocasiones, se tiene que reestructurar la construcción en vista del comportamiento inadecuado observado para un sismo de menor intensidad que el de diseño. En estos casos, el ingeniero depende de los resultados de la inspección, del análisis y, en un alto porcentaje, de su criterio, conocimiento y experiencia para hacer el diagnóstico adecuado.

También es conveniente tener en consideración que existen diversos elementos estructurales que, por su forma o por sus condiciones de sollicitación, pueden presentar falla de tipo frágil; ejemplo de esto lo constituyen las fallas por cortante en muros. En estos casos será necesario que el procedimiento de reparación además de restaurar la resistencia, proporcione capacidad de deformación al miembro estructural y, consecuentemente a la estructura.

Cabe decir que los materiales que se utilicen para la reparación deben alcanzar altas resistencias a temprana edad, porque la rapidez de ejecución es muy importante. También se debe mencionar que el sentir general de los expertos en el tema de reparación de estructuras es que la construcción más problemática

de rehabilitar es la formada a base de elementos de mampostería, los cuales son capaces de soportar altas cargas laterales, pero tienen poca reserva de resistencia; además, se ha observado que por lo general el costo de reparación es mayor que el de otras construcciones con sistema de estructuración diferente.

Mampostería de piedras artificiales sin refuerzo. En el caso que la estructura dañada presente falla por las juntas puede no ser necesario utilizar refuerzo para aumentar su seguridad a niveles adecuados, a continuación se resumirá un estudio realizado por el autor para tratar de establecer cómo se puede incrementar la resistencia de este tipo de mampostería.

Se ensayaron diversos tipos de mampostería (piezas y morteros) provocando los modos de falla típicos ante fuerzas cortantes, después de lo cual se repararon como enseguida se menciona: 1) mediante un aplanado de mortero rico en cemento (1:0:3 cemento, cal, arena); 2) llenando con mortero los huecos de las piezas y 3) combinando los dos procedimientos anteriores. Cabe mencionar que en ningún caso se volvieron a pegar las juntas donde el espécimen falló originalmente, sino solo se superpusieron las piezas y se aplicó el procedimiento de reparación; lo anterior se hizo para que los resultados obtenidos estuvieran dentro de la seguridad al ser aplicados porque por lo general se acostumbra "rajuelar" la zona dañada de las mamposterías.

Los especímenes ensayados (muretes) eran de aproximadamente 60 x 60 cm y se les aplicaba una carga en una de sus

diagonales, lo que producía una falla de cortante o tensión diagonal. Las características de las diferentes mamposterías antes y después de reparadas se pueden ver en la tabla 1. En ella sólo se presentan los valores medios y sus coeficientes de variación; mientras que en la tabla 2 se muestran los valores mínimos probables que se calcularon con la expresión propuesta por el Reglamento para construcciones del D.D.F., es decir como

$$v^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5 \text{ C.V.}}$$

donde

v^* valor de diseño que tiene una probabilidad de no ser alcanzado del 2%

\bar{v} valor medio obtenido del ensaye
C.V. coeficiente de variación de la muestra

La interpretación de los resultados se hará con base en esta última tabla con la finalidad de tomar en cuenta la variabilidad de los datos y referirse a valores que tengan una probabilidad muy baja de no alcanzarse.

Debido a lo limitado del estudio en cuanto a número de variables: piezas y morteros, la interpretación que se realice deberá tomarse con reserva, y servirá únicamente como guía en caso de tratar de extrapolar los resultados.

Considerando lo anterior, y el comportamiento observado de los especímenes durante su ensaye, se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Si la capacidad de la mampostería está limitada por la baja calidad del mortero (falla por las juntas), se puede lograr un incremento sustancial

de la resistencia empleando un mortero de buena calidad ya sea aplanado o rellenado de los huecos de las piezas.

- A mejor calidad del aplanado mayor incremento de la resistencia. Aún cuando lo limitado del estudio no permita determinarlo, debe haber un límite para lograr este efecto en forma óptima. es decir, debe existir alguna relación entre resistencia del aplanado, capacidad alcanzada y/o capacidad original.

- El aplanado aumenta la resistencia a cortante cuando hace que cambie el tipo de falla de la mampostería; esto generalmente sucede cuando el mortero del aplanado es de mucho mejor calidad del que se tiene en las juntas. El incremento esperado en estas condiciones es cuando menos del 40 por ciento.

- En el caso de llenar los huecos, se ve de la tabla 2 que el incremento es del orden del 50 por ciento, prácticamente independiente del tipo de pieza (porcentaje de huecos) y de mortero utilizado; se observa también que cambia el modo de falla. Esta forma de reparación es adecuada cuando se quiere conservar la apariencia de los muros y la falla ha sido por las juntas.

- El combinar el llenado de los huecos con un aplanado en las caras laterales aumenta sustancialmente la resistencia; incluso, se nota una cierta influencia del porcentaje de huecos de las piezas que componen la mampostería. La fig 2 muestra dicha variación para los resultados de este estudio; en el eje vertical se tiene el

factor por el que se incrementa el valor de la resistencia original de la mampostería, mientras que en el horizontal el porcentaje de huecos de la misma. Si por los valores promedio para el bloque de concreto y el tabique extruido se pasa una línea recta que también pase por el punto (0, 1), que correspondería a una pieza sólida (0 por ciento de huecos), se observa una variación aproximadamente lineal, haciendo ver que el incremento de resistencia es prácticamente proporcional al área de huecos.

Lo expresado en el párrafo anterior es cierto siempre y cuando se cumplan simultáneamente las siguientes condiciones:

- a) La mampostería original no presenta una falla neta de tensión diagonal (que sugeriría que está agotada totalmente la capacidad de la mampostería).
- b) Se llenan completamente *todos* los huecos.
- c) Se utiliza un mortero de buena calidad tanto para el aplanado como para el llenado de los huecos.

Cumpliendo con lo anterior, la expresión que resulta de los datos de este estudio para calcular el incremento sobre la resistencia original es

$$F = 1 + 0.03 H_g$$

donde F es el factor que incrementa la resistencia original y H_g el porcentaje de huecos de las piezas. Debe tenerse presente que si la falla de la mampostería original tiende a ser por las piezas (o combinada), el

incremento en resistencia es menor cuando la resistencia de la mampostería original es alta; por ejemplo, al comparar la mampostería de bloque de concreto con mortero 1:2:9 AB con aquella con mortero 1:0:3 AB, en el primer caso el incremento es del 80 por ciento respecto a la resistencia original, mientras que en el segundo es sólo del 30 por ciento. En el caso del tabique extruido la diferencia es menor (2.35 versus 2.15) para los mismos criterios de reparación que en el caso anterior.

Se observa también que el emplear un buen mortero como aplanado es equivalente a sólo llenar los huecos.

Como conclusión de esta fase experimental puede decirse que es posible incrementar sustancialmente la capacidad de mampostería sin refuerzo ya sea mediante la colocación de un aplanado a base de morteros de buena calidad y/o llenando los orificios de las piezas huecas. En el caso de que las mamposterías dañadas ya posean un aplanado y el tipo de falla sea por las juntas, la colocación de otro aplanado de mucha mejor calidad seguramente incrementará su capacidad; mientras que si la falla de un muro, con o sin aplanado, es por tensión diagonal, sólo será posible incrementar su resistencia mediante aplanados reforzados con malla de acero electrosoldada. En las mamposterías de piezas huecas el llenar los huecos incrementará su capacidad salvo en el caso que la falla hubiera sido de tensión diagonal; en este caso el llenado cuando más recuperará su capacidad, pero como por apariencia debe ponerse un aplanado, este seguramente incrementará su resistencia. Es

necesario valuar experimentalmente las últimas variantes.

Mampostería de adobe. En diversos estudios, refs 1 a 4, se proponen algunos procedimientos para reforzar y aumentar la seguridad ante sismo de estas estructuras. A continuación se describen los que se consideran más convenientes:

1. Una viga de concreto en la parte superior de los muros, como se muestra en la fig 3. Con este procedimiento se logra una liga adecuada con el adobe y con el techo mediante detalles constructivos sencillos (ref 2); se mejora sustancialmente el comportamiento si, además, se colocan tensores verticales en los extremos de los muros.
2. Otra opción es emplear una viga de alma abierta de madera (ref 3), como se muestra en la fig 4.
3. Una forma muy sencilla de ligar los muros es mediante barras de acero tensadas, fig 4b; este procedimiento se ha empleado para reforzar viviendas de mampostería de piedra dañadas a raíz del temblor de Skopje, Yugoslavia (1963) y los del Friuli, Italia (1975); el empleo de tensores verticales mejora sustancialmente el comportamiento.
4. Un procedimiento que tiende a lograr refuerzo, rigidización y liga de los muros, así como su protección contra la intemperie es el que se muestra en la fig 5, consiste en colocar un recubrimiento de mortero de cemento sobre una malla de acero de refuerzo cuidadosamente fijada al muro por am

bas caras, formando un elemento compuesto de adobe y mortero reforzado (ref 4).

Se tiene evidencia experimental sobre los sistemas de refuerzo 1, 3 y 4, que proporcionan una mejoría notable de comportamiento y resistencia ante sismo (cuando menos se duplica); en la ref 1 se describe con detalle el ensaye de modelos de vivienda reforzada con los procedimientos antes descritos.

Estos criterios de refuerzo también pueden aplicarse a construcciones de mampostería de tabiques de barro o de concreto sin refuerzo.

Mampostería de piedras artificiales con refuerzo. En algunos países como Estados Unidos y Nueva Zelanda la mampostería con refuerzo interior es bastante popular como sistema constructivo; sin embargo, es usual que se llenen completamente los huecos de las piezas con un mortero muy fluido y con abundante refuerzo vertical y horizontal. Con este sistema, en mampostería de bloques de concreto, se obtiene prácticamente un muro monolítico porque el concreto colado en los huecos se adhiere perfectamente al bloque; en piezas de barro, la eficacia del procedimiento es menor porque el concreto o mortero empleado para llenar los huecos, al contraerse por fraguado, se separa del tabique; el empleo de aditivos estabilizadores puede evitar este problema. En general la reparación de mampostería con refuerzo interior resulta, si no imposible de realizar, si muy complicada.

El procedimiento de reparación depende del tipo de pieza y mortero que se ten-

ga; por lo general es necesario añadir refuerzo al muro después de reparar localmente la grieta. A continuación se mencionan algunos estudios que se han realizado en esta dirección.

En la ref 5 se describe el empleo de mallas de acero en ambas caras del muro como sistema de refuerzo; también se describe la reparación local de las grietas. En este último caso se observó que la resistencia original se recupera casi totalmente y en el caso de mampostería de piedra, aumenta aproximadamente al doble, esto lo explica el autor, es debido a que la mampostería absorbe parte del material que se utiliza para reparar las grietas.

El uso de malla de acero se realizó uniendo el refuerzo de ambas caras mediante alambroón y cubriéndolas después con mortero que tenía un espesor de 3 cm; además, se reparó localmente la grieta. Con este procedimiento se sobrepasó la resistencia original.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se realizó un programa experimental exploratorio tendiente a determinar los procedimientos más efectivos para la reparación de mampostería dañadas por sismo o hundimiento diferenciales.

Se repararon ocho muros que habían sido previamente llevados a la falla; seis de ellos se ensayaron bajo carga monotónica, como parte de otra investigación, y dos se probaron recientemente ante cargas laterales alternadas. Los seis primeros eran de tabique extruído con castillos en sus extremos; la falla consistía en una grieta de tensión diagonal en el muro la cual se prolongaba

también sobre los castillos. En general, los muros se llevaron a un estado muy avanzado de falla y su capacidad es tructural quedó prácticamente anulada. Los dos últimos muros eran de tabique rojo y quedaron en las mismas condiciones.

La reparación se hizo en el marco confiante y en la mampostería. En todos los casos los castillos se resanaron con un mortero de alta resistencia; en la mampostería la reparación se efectuó de diversas maneras.

El muro 1 sufrió falla de cortante (grietas por las juntas); se reparó relleno las grietas con un mortero comercial denominado Polimor (de alta adherencia). En el muro 2 la reparación se efectuó resanando las grietas que se habían desarrollado con un mortero de cemento que contenía un aditivo para aumentar la adherencia; después se volvió a colocar el aplanado que originalmente tenía. El muro 3, que falló por tensión diagonal, (la grieta atraviesa tanto las juntas como las piezas), se reparó mediante rajueo con mortero de cemento, colocando después malla de alambre, tipo gallinero, en un lado del muro; finalmente se cubrió la malla con un aplanado de yeso. El muro número 4 solamente se reparó en la zona de falla con mortero de cemento. En el muro 5 se reparó la zona dañada con mortero común, se colocó después una malla de alambre entrelazada de 7 cm por lado, que se fijó mediante taquetes al marco perimetral y al muro; finalmente, se añadió un aplanado de yeso y cemento. En el muro 6 se eliminó el aplanado de yeso que tenía para colocarle una malla tipo gallinero, después de haber rajue-

leado la zona de falla con un mortero de cemento; finalmente se volvió a colocar un aplanado de cemento y yeso. Los muros 7 y 8 eran idénticos; al primero se le colocó, después de resanar la grieta con mortero de alta resistencia, una capa de malla electrosoldada 6 x 6 14/14, por ambas caras, que se cubrió con un aplanado de cemento-arena en proporción 1 a 3 (en volumen); el muro 8 tenía el doble de refuerzo.

En la tabla 3 se presentan las características originales de los muros y las que se determinaron después de la reparación. El ensaye de los muros reparados se efectuó bajo las mismas condiciones que el original.

Las figs 6 a 11 muestran las curvas carga diagonal deformación angular (desplazamiento en la parte superior del muro dividido por su altura) para los seis primeros muros, tanto para el muro original como para el reparado, y en las figs 12 y 13, los dos últimos ensayos; sobre el eje vertical se representa el esfuerzo cortante promedio.

El muro 1 recuperó su resistencia y rigidez originales casi totalmente; la falla del muro reparado le ocasionó una grieta diferente a la del muro original, la cual da fe de las buenas características de adherencia del material empleado.

En los muros 2 a 6 se presentó la misma configuración de agrietamiento que en el muro original. El muro 2 conservó hasta la falla la misma rigidez que en el muro original.

El muro 3 alcanzó casi totalmente la re

sistencia original y conservó la misma rigidez; se considera que el aplanado es el que contribuyó esencialmente a proporcionar la resistencia y rigidez al muro reparado y que el acero de refuerzo trabajó solo después del agrietamiento original; lo anterior se debió a la baja cantidad de refuerzo empleado y a que el tipo de malla usada no es eficiente para estos fines.

El comportamiento del muro 4 demuestra que resanar simplemente las grietas con mortero común no es eficiente como método de reparación; la rigidez y la resistencia se reducen drásticamente.

El muro 5 conservó la rigidez original hasta el agrietamiento, el que se presentó cuando se rebasó la contribución del aplanado (comparar muro 3 con 5); no disminuyó la resistencia gracias a la malla de refuerzo.

Con el muro 6 se trató de ver el efecto de la malla de refuerzo; originalmente el muro tenía aplanado de cemento. Se observó que el muro no conservó su rigidez original, debido a que el aplanado que se utilizó después de reparar las grietas fue de menor calidad que el que tenía originalmente. La malla de alambre comenzó a funcionar después que se agrietó el muro, incrementando la resistencia hasta que se dañó el marco perimetral; no se llegó a igualar la resistencia original probablemente por la poca cuantía de refuerzo y por el tipo de malla utilizada.

Durante esta serie de seis muros se observó que, para deformaciones grandes, el aplanado se despega del muro hacien-

do que la malla se desprenda sobre la diagonal de compresión, dando lugar a una disminución de la resistencia. Sería conveniente, por lo tanto, utilizar algún aplanado que se adhiriera mejor a la mampostería, o bien sujetar mejor el refuerzo al muro para ayudar a este propósito. Esto se hizo en los muros 7 y 8 donde las mallas de refuerzo de ambas caras se sujetaron entre sí, evitando el desprendimiento del aplanado y mejorando el comportamiento, como se observa en las figs 12 y 13.

Del análisis del comportamiento de los muros, del estudio de las figs 6 a 13 y de la tabla 4.2, se extraen las siguientes conclusiones:

- a) La rigidez del muro reparado es casi la misma que la del original hasta el instante de agrietamiento, siempre y cuando se utilicen morteros resistentes para resanar la grieta.
- b) El comportamiento de muros en los que sólo se resana la grieta con mortero común, resulta muy inferior al del muro original.
- c) El aplanado ayuda a retardar la aparición del agrietamiento en muros reparados con mortero común.
- d) El acero de refuerzo colocado en forma de malla y cubierto por un aplanado de yeso o cemento, es efectivo una vez que se agrieta el muro.
- e) La presencia del acero hace dúctil y resistente al muro después del agrietamiento.

- f) Con los sistemas de reparación empleados nunca se igualó la resistencia original, pero se llegó a valores bastante cercanos cuando se utilizó mortero de alta resistencia para resanar la grieta y porcentajes bajos de acero de refuerzo en forma de malla.
- g) Para las mamposterías aquí empleadas, la malla de alambre tipo gallinero parece ser suficiente para restaurar la resistencia original, y usándola por ambos lados del muro daría mejor resultado.
- h) Después de agrietada la mampostería, la resistencia disminuye notablemente cuando se daña el marco perimetral y no existe otro tipo de refuerzo.
- i) La resistencia después del agrietamiento es función del porcentaje de refuerzo.

Por lo anterior sería conveniente seguir con estudios que tendrían los siguientes objetivos:

- 1) Determinar procedimientos para calcular la cantidad de acero necesaria para alcanzar cierto porcentaje de la resistencia original y dar capacidad de deformación al muro reparado.
- 2) Probar aditivos que permitan aumentar la resistencia de la junta fallada para que también se recupere la rigidez original.
- 3) Ensayar diversos tipos de armado con el objeto de encontrar el recomendable para evitar la falla del marco

perimetral.

CONCLUSIONES

El comportamiento de una estructura de mampostería reparada depende en gran medida de la elección del procedimiento de reparación, el que se debe seleccionar después de estudiar las causas que produjeron los daños, la naturaleza de éstos y la estructuración de la obra.

Generalmente los elementos de mampostería sin refuerzo son los más dañados cuando ocurre un sismo. Desde hace tiempo se ha tratado de establecer métodos de reparación que restituyan o superen la resistencia y rigidez originales; de estudios recientes se desprende que esto es posible siempre y cuando se emplee un procedimiento adecuado que considere lo establecido en el párrafo anterior. Generalmente habrá necesidad de colocar refuerzo en el muro, bien sea en forma de malla o dispuesto diagonalmente sobre el muro o enmarcando el elemento de mampostería, pudiendo colocarse sobre una o las dos caras del muro. Es dudosa la efectividad de sólo del rajuelo de las grietas como método de reparación. Al momento no existe criterio alguno para calcular la cantidad de refuerzo necesaria para hacer que la mampostería alcance cierta resistencia predeterminada y aumente su capacidad de deformación; el autor trabaja sobre el particular y espera que muy pronto pueda establecerse un criterio racional que permita llegar a determinar la cuantía de refuerzo necesaria para que un muro de mampostería sea capaz de soportar cierto nivel de fuerza cortante incrementando al mismo tiempo la capacidad de deformación de la mam-

postería.

REFERENCIAS

- 1 Hernández O., Valencia E. (1980), "Refuerzo de la vivienda de bajo costo en zonas sísmicas", Instituto de Ingeniería UNAM, Informe de Investigación del proyecto 0701.
- 2 Escalante C, Merrifield C. (1977), "Casas de adobe antisísmicas", Reporte interno de la Dirección General de Servicios Técnicos SAHOP.
- 3 "Asismicidad en vivienda económica" (1959), Centro Interamericano de Vivienda y Planteamiento, Bogotá.
- 4 Meli R, y Hernández O., (1976), "Recomendaciones sobre el empleo de la mampostería en construcciones para vivienda en zonas sísmicas", Ingeniería Sísmica N° 14.
- 5 Sheppard P, y Tervelj S., (1980), "The effect of repair and strengthening methods for masonry walls", Proceedings 7WCEE, Vol. 6, pag 255-262, Estambul, Turquía.
- 6 Makino M. et al" (1980), "An investigation for the design of framed structures with infill walls", Proceedings 7WCEE, Vol 4, pag 369-372, Estambul, Turquía.

TABLA 1 RESULTADOS PROMEDIO

Material	O R I G I N A L				Mortero	R E P A R A C I O N		
	f_p a)	Mortero	\bar{v} b)	C.V.		Tipo	\bar{v} b)	C.V.
TABIQUE	109	0:1:3	2.47	21	A	aplanado	2.68	32
					B	aplanado	4.72	44
		1:0:3	5.59	8	B	aplanado	6.32	32
TABIQUE EXTRUIDO	241	1:2:9	4.43	23	A	aplanado	5.7	4
					B	aplanado	6.0	22
					B	huecos	6.1	16
		A-B	aplanado huecos	10.36	23			
		1:0:3	5.02	19	A-B	aplanado huecos	11.29	22
BLOQUE CONCRETO	102	1:2:9	3.54	21	A	aplanado	4.93	11
					B	aplanado	5.74	18
					B	huecos	6.70	38
					A-B	aplanado huecos	7.37	30
					A-B	aplanado huecos	7.69	20

* A mortero 1:1:6

a) resistencia a compresión, kg/cm^2

B mortero 1:0:3

b) resistencia a cortante, kg/cm^2 A-B mortero A en aplanado
y B en huecos

TABLA 2 VALORES DE DISEÑO (C.V. \geq 15%)

Material	f _p * a)	O R I G I N A L			R E P A R A C I O N				
		Mortero*	+	v* b)	+	Mortero*	Tipo	v̄* b)	v̄*/v*
TABIQUE	66	0:1:3	J	1.62	J	A	aplanado	1.49	0.92
					T	B	aplanado	2.25	1.39
		1:0:3	T	4.07	T	B	aplanado	3.51	0.86
TABIQUE EXTRUIDO	175	1:2:9	J	2.81	J	A	aplanado	4.15	1.47
					C	B	aplanado	3.87	1.38
					C	B	huecos	4.36	1.55
					T	A-B	aplanado huecos	6.58	2.34
		1:0:3	J	3.40	T	A-B	aplanado huecos	7.28	2.14
BLOQUE CONCRETO	69	1:2:9	J	2.32	C	A	aplanado	3.59	1.41
					C	B	aplanado	3.96	1.70
					C	B	huecos	3.43	1.48
					T	A-B	aplanado - huecos	4.21	1.81
							1:0:3	C	3.86

+ tipo de falla
 J por las juntas
 T por las piezas
 C combinada

Mortero*
 A 1:1:6
 B 1:0:3
 A-B mortero A en aplanado y B en huecos

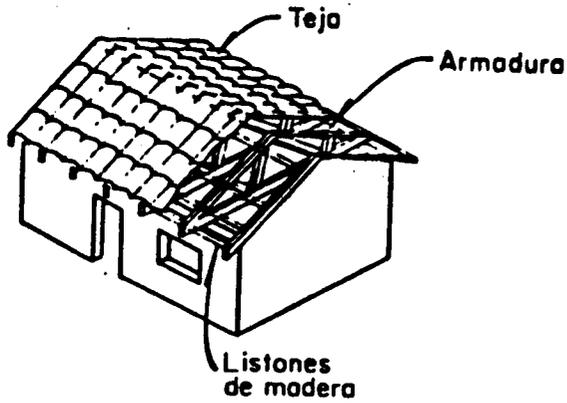
a) resistencia a compresión, kg/cm²
 b) resistencia a cortante, kg/cm²

TABLA 3 COMPARACION DE PROPIEDADES

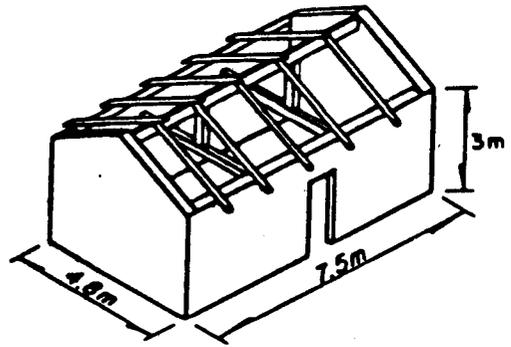
Muro No	Características adicionales en el muro reparado	Porcentaje acero	1) $P_{m\acute{a}x}$		2) $\gamma_{m\acute{a}x} \times 10^3$	
			I	II	I	II
1	Reparación de grieta con mortero Polimor	0	19.20	16.9	0.83	0.61
2	Reparación de grieta con mortero Adhecón	0	24.8	13.2	1.15	0.63
3	Reparación con mortero común malla de gallinero y recubrimiento de yeso	.0008	14.1	13.0	1.03	1.02
4	Reparación de grieta con mortero común	0	11.2	7.4	0.98	7.29
5	Reparación con mortero común malla trenzada y recubrimiento	.001	22.8	18.1	1.99	3.79
6	Reparación con mortero común y malla de gallinero	.0008	14.8	12.2	1.73	3.52
7	Reparación con mortero 1:0:3 (cem: cal: arena) y malla de acero	.0008	5.7	13.0		
8	Similar al 7	.0015	5.8	>>13.0		

1. Carga, ton
2. Distorsión

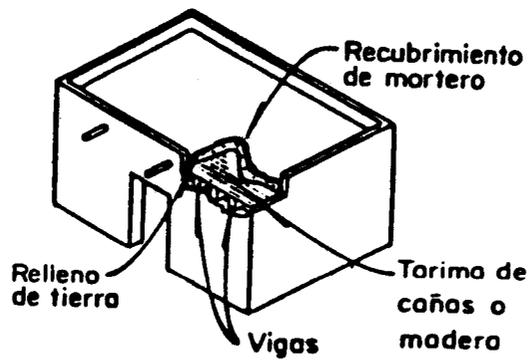
I. Muro original
II. Muro reparado



a) Armaduras de madera



b) Vigas y puntales



c) Vigas de madera con terrado

Fig 1a. Tipos comunes de vivienda de adobe

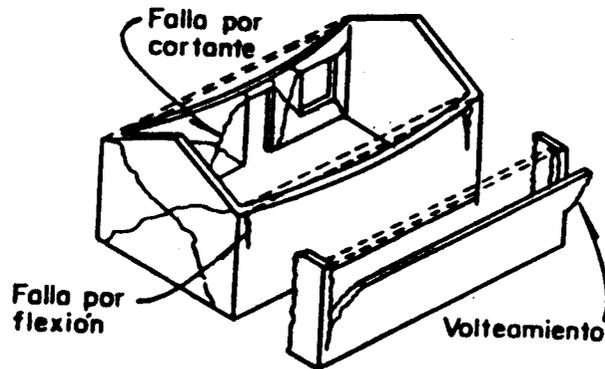


Fig 1b. Modos de falla de viviendas de adobe

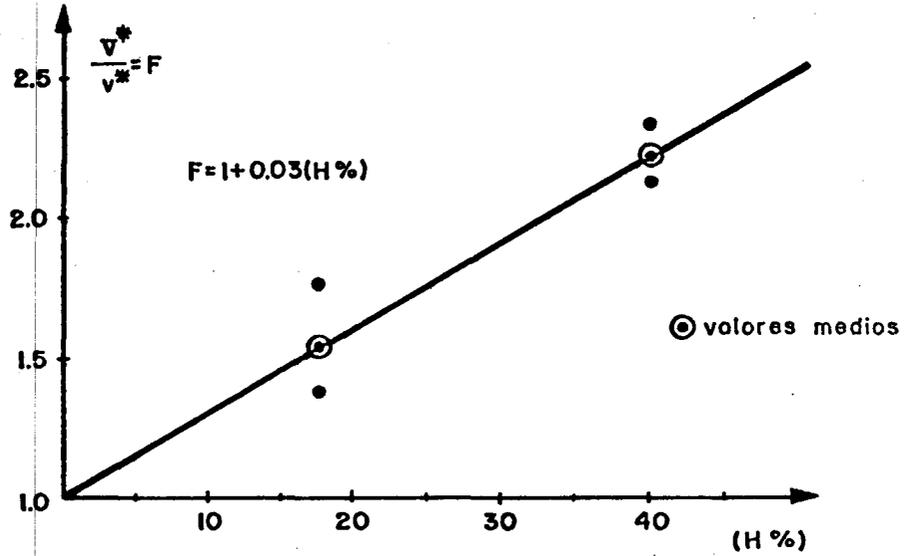


Fig 2. Aumento de la resistencia con el llenado de huecos y aplanado en las caras laterales

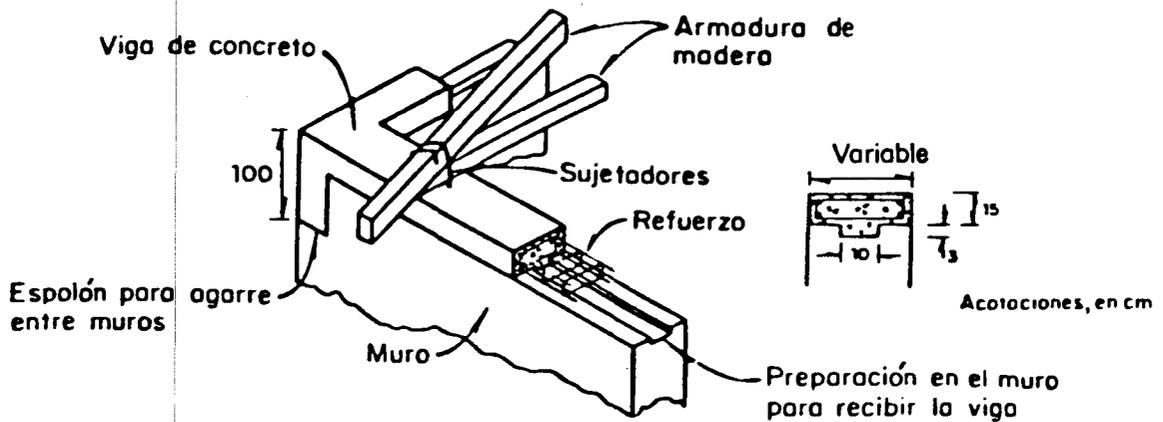
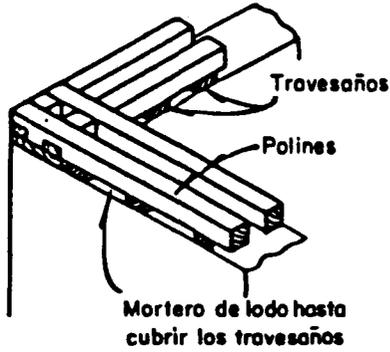
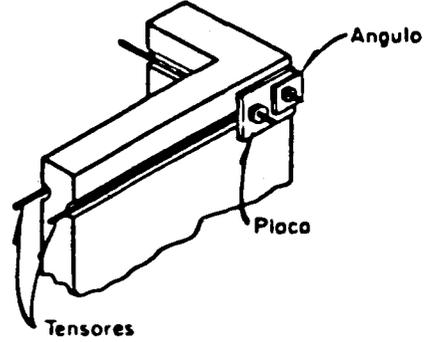


Fig 3. Refuerzo con viga-cadena de concreto



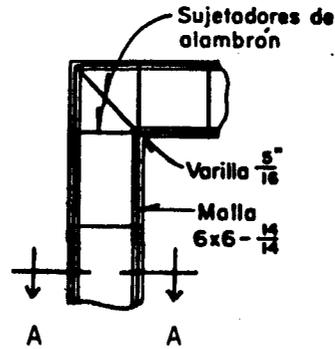
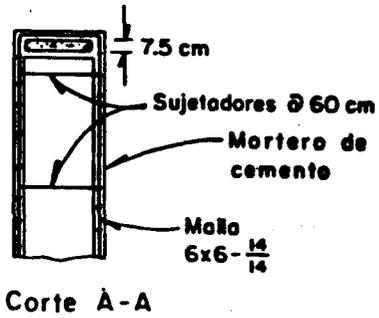
(a) Refuerzo con viga de madera



(b) Refuerzo con tensores de acero

Fig 4. Otros procedimientos

Detalle en la parte superior del muro



Detalles de anclaje del refuerzo en las esquinas

Fig 5. Recubrimiento de mortero sobre malla

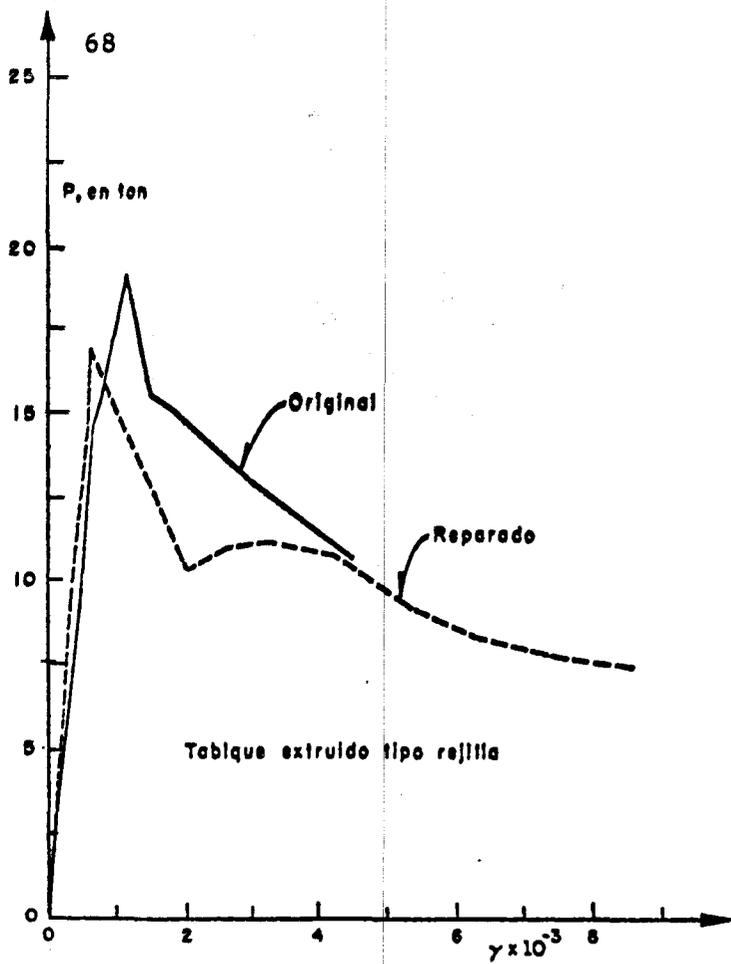


Fig 6. Muro 1. Reparación de grieta con adhesivo Polímer

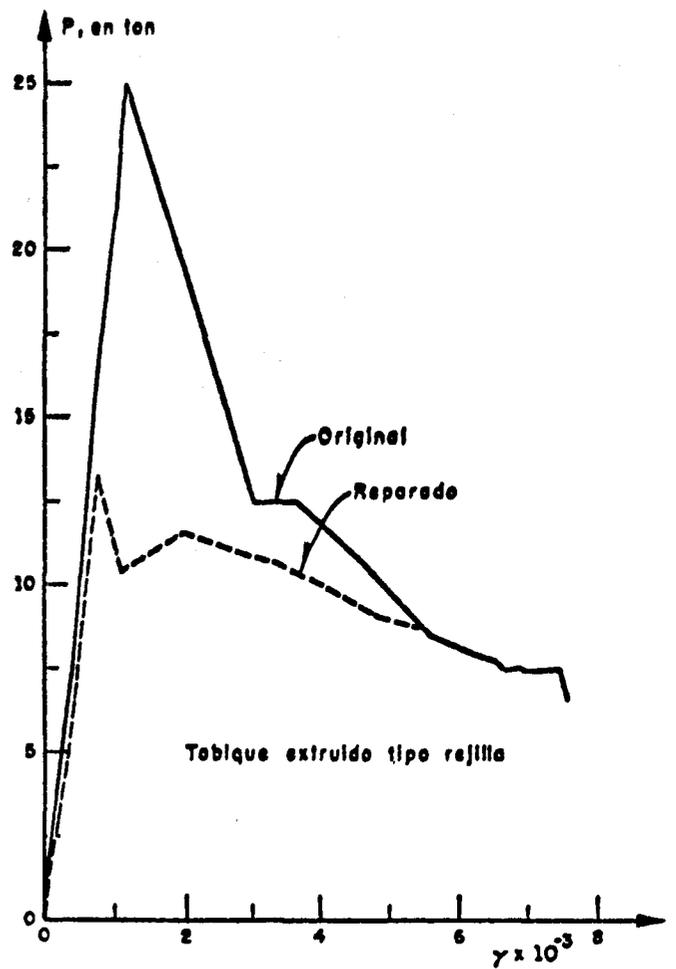


Fig 7. Muro 2. Reparación de grieta con Adheción

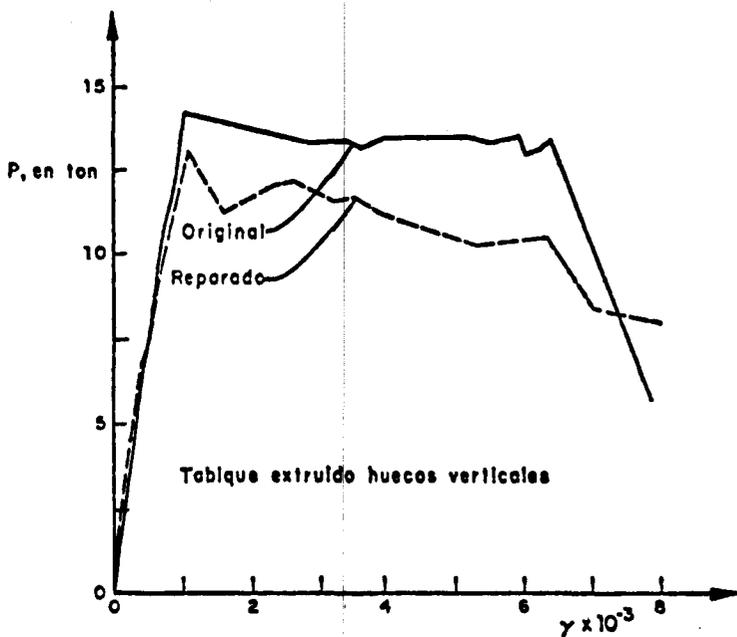


Fig 8. Muro 3. Reparación de grieta con mortero común, malla de gallinero y aplanado de yeso y cemento

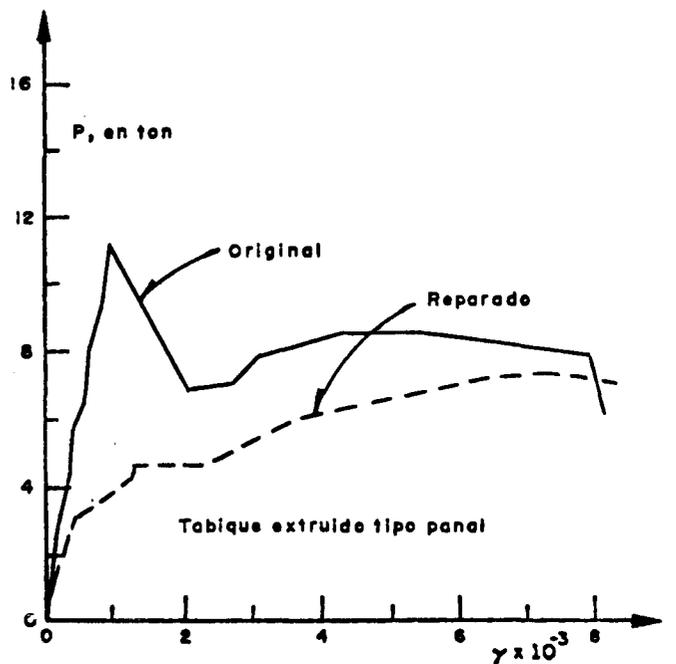


Fig 9. Muro 4. Reparación de grieta con mortero común

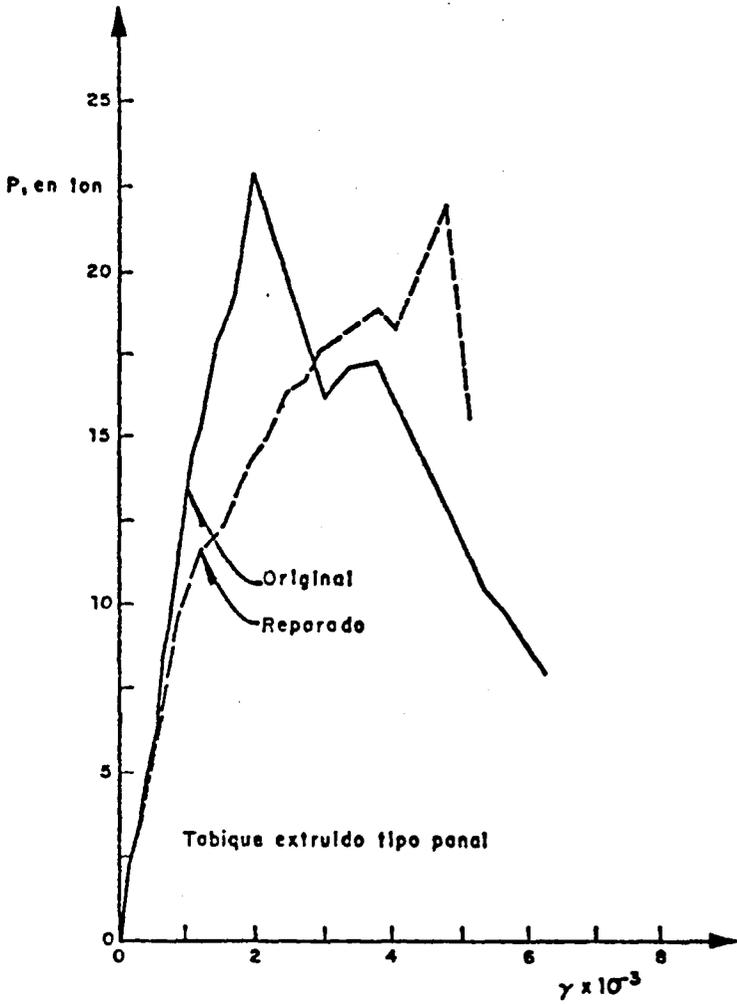


Fig 10. Muro 5. Reparación de grieta con mortero común, malla trenzada y aplanado de mortero

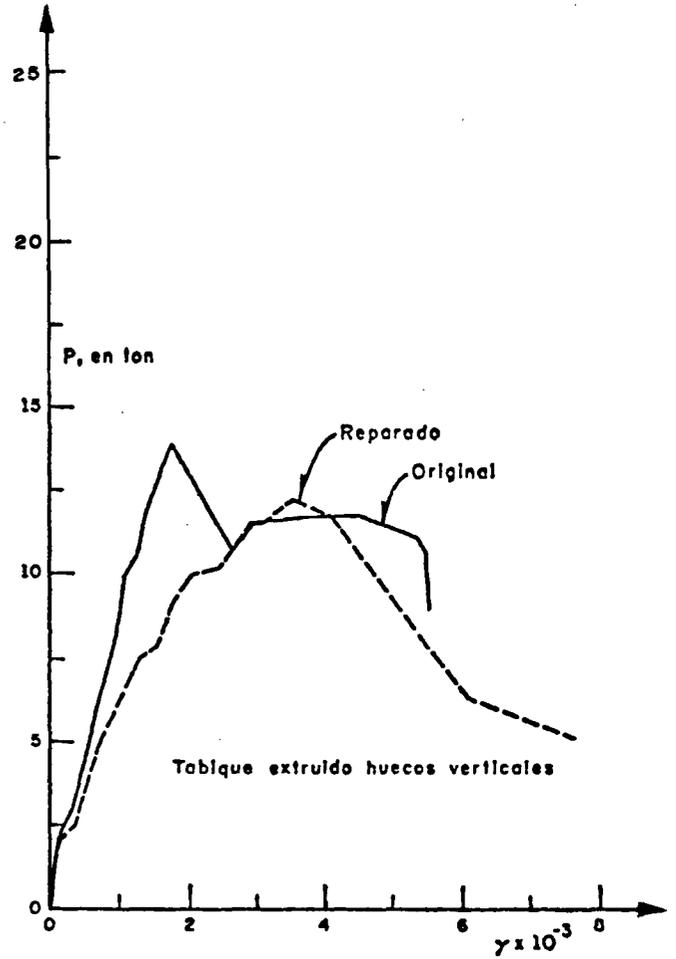


Fig 11. Muro 6. Reparación de grieta con mortero común, malla de gallinero y aplanado de yeso y cemento

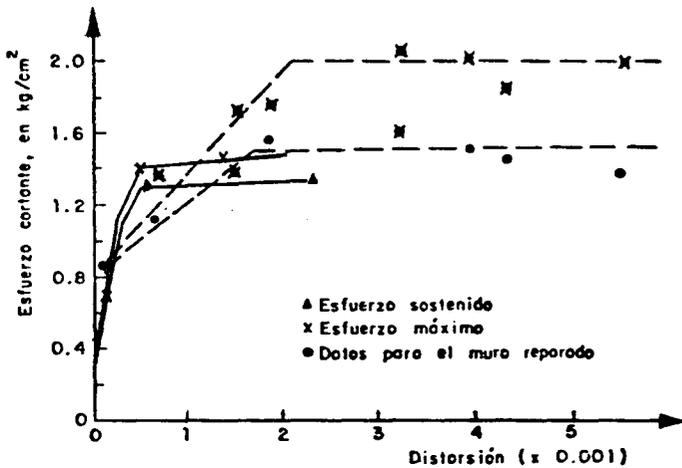


Fig 12. Envolventes de esfuerzos del muro 7

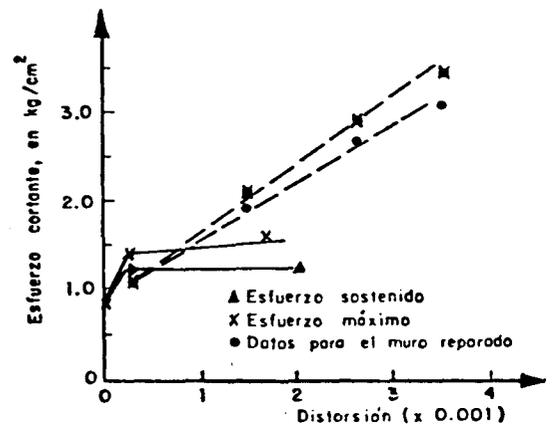


Fig 13. Envolventes de esfuerzos del muro 8