

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE TABIQUES REFORZADOS CON VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO

J. Gustavo Tumialan¹, Angel San Bartolome² y Antonio Nanni³

¹Simpson Gumpertz & Heger Inc., Boston, Massachusetts, USA

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

³University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, USA

RESUMEN

Los tabiques de albañilería no reforzada son propensos a fallar cuando se encuentran sometidos a cargas sísmicas coplanares y fuera del plano, por otro lado, los terremotos recientes han mostrado que el desarrollo de estrategias preventivas de reforzamiento en la albañilería existente es una necesidad. En este contexto, los materiales compuestos FRP (fiber reinforced polymer) ofrecen una solución viable para controlar los efectos sísmicos.

Este artículo presenta los resultados experimentales de 4 especímenes, correspondientes a un programa de investigación relacionado con el reforzamiento de los tabiques de albañilería de concreto utilizando varillas de fibra de vidrio, *Glass FRP* (GFRP). Los especímenes a escala natural, tres muros bordeados por pórticos de concreto armado y un pórtico, fueron sometidos a cargas sísmicas coplanares y perpendiculares al plano. Los resultados indicaron que los especímenes reforzados con las varillas de fibra de vidrio, pudieron alcanzar distorsiones de 0.7% sin pérdida de resistencia al corte y que el reforzamiento por flexión ante acciones perpendiculares al plano del muro no era necesario para ese nivel de distorsión lateral.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo existen un alto porcentaje de edificios de albañilería no reforzada, pero los terremotos recientes han demostrado su alta vulnerabilidad, por lo que es necesario establecer una estrategia de reforzamiento. En este contexto, las varillas de fibra de vidrio pueden constituir una solución viable, no solo por sus buenas propiedades mecánicas, sino por su bajo costo de instalación, su alta resistencia a la corrosión y también porque las dimensiones del muro a reforzar no varían.

Investigaciones previas (Refs. 1, 2 y 3) han demostrado que la resistencia al corte de los muros se incrementa significativamente con el uso de las láminas y varillas de fibra de vidrio; sin embargo, para el caso de los tabiques, la interacción con el pórtico de concreto armado no fue considerada. Despreciar esta interacción puede conducir a sobreestimar la capacidad del tabique. De esta manera, es necesario realizar ensayos que representen las condiciones reales de interacción portico-tabique, lo cual conducirá al desarrollo de mejores recomendaciones de diseño.

Dependiendo de las consideraciones en el diseño, los tabiques pueden o no trabajar a carga sísmica coplanar. Muchas veces, por simplicidad, la interacción tabique-pórtico es ignorada, ésta hipótesis es válida sólo si se aísla al tabique del pórtico, pero si el tabique está en contacto con el pórtico el despreciar su contribución puede dar lugar a diseños no conservadores. Cuando se produce la interacción portico-tabique, los porticos se rigidizan causando una redistribución de las cargas laterales en la planta y la elevación del edificio. El incremento de rigidez causado por el tabique, hace que el sistema absorba mayor carga lateral que la calculada despreciando la interacción, y de fallar el tabique, el pórtico se verá sobre esforzado, de allí la necesidad de reforzar al tabique para que mantenga su resistencia.

En este artículo se presentan los resultados de los ensayos de tres tabiques bordeados por pórticos de concreto armado y de un pórtico sin tabique. Dos de los tabiques fueron reforzados con varillas de fibra de vidrio colocadas en las juntas horizontales de mortero. El programa experimental, cuyo objetivo fue evaluar el comportamiento sísmico de los tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio y proponer recomendaciones para el reforzamiento con estas varillas, constó de tres partes:

- Parte I, ensayo de carga lateral cíclica coplanar al tabique. Esta parte fue completada cuando los especímenes alcanzaron una distorsión de 0.7%, correspondiente al máximo valor especificado por la norma sismorresistente E-030 [4].
- Parte II, ensayo de simulación sísmica en mesa vibradora, con acciones perpendiculares al plano del tabique previamente dañados en el ensayo anterior.
- Parte III, reensayo con carga lateral monotónica coplanar. En esta etapa los especímenes fueron llevados hasta el colapso.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Especímenes

Los tabiques fueron construidos empleando bloques de concreto vibrado en aparejo de soga, con un espesor de 14 cm. Las dimensiones del tabique fueron 2.60 m de largo por 2.40 m de alto. Los pórticos de concreto armado consistieron de vigas y columnas con secciones transversales de 30×30 cm. El refuerzo longitudinal de las columnas estuvo compuesto por 6 barras de $\frac{3}{4}$ " y los estribos por barras de $\frac{3}{8}$ ", detalles del refuerzo se aprecian en la Figura 1. El pórtico fue diseñado para que tenga suficiente flexibilidad, de esta manera, el comportamiento a carga lateral del sistema sería controlado por el tabique. Todos los tabiques fueron construidos por un albañil calificado, para no introducir otras variables, como la mano de obra, la trabajabilidad del mortero, etc.

El propósito de ensayar al pórtico sin tabique, fue determinar su rigidez y resistencia, con lo cual, los cambios en el comportamiento del pórtico con tabique fueron posibles de asignarlos a la presencia del tabique. El tabique del espécimen IM1 no fue reforzado. El tabique del espécimen IM2 fue reforzado con varillas de fibra de vidrio de $\frac{1}{4}$ " de diámetro que terminaban a 10 cm de la cara interior de las columnas, estas varillas estuvieron espaciadas a 20 cm (en cada junta horizontal). El reforzamiento del tabique del espécimen IM3 fue similar al de IM2, con la diferencia que las varillas anclaban en las columnas. El anclaje total de las varillas en las columnas hubiese sido preferible, pero para esta investigación se utilizó un anclaje de 10 mm debido a la dureza del concreto y a la posición del refuerzo existente en las columnas, el que tenía un recubrimiento de 20 mm. Los tabiques se integraron con el pórtico mediante mortero aplicado durante la construcción del tabique en la interfase bloque-pórtico, por esta razón esta clase de muro se denomina "tabique de corte". En la Tabla 1 se presenta un resumen de los especímenes.

2.2. Materiales

Los ensayos realizados sobre pilas de albañilería proporcionaron una resistencia a compresión axial de 6.4 MPa. Las varillas de acero de 19 mm y 9.5 mm de diámetro, empleadas como refuerzo del pórtico, tuvieron una resistencia a la fluencia de 429 MPa. Los ensayos realizados sobre probetas estándar de concreto, proporcionaron una resistencia a compresión de 24.8 MPa.

Las varillas de fibra de vidrio (GFRP) son fabricadas siguiendo un proceso de pultrusión usando fibras de vidrio y una resina de vinilester. El contenido de las fibras es aproximadamente 60% del material compuesto. Las varillas están recubiertas con una capa de arena fina para mejorar la adherencia entre el concreto o mortero con la pasta de epóxico. Las varillas de fibra de vidrio

usadas en esta investigación fueron de ¼" (diámetro de 6.25 mm), con una resistencia a tracción de 827 MPa y un módulo de elasticidad de 40.7 MPa. Estas varillas fueron embebidas en las juntas horizontales empleando una pasta de epóxico que tuvo una resistencia a compresión de 86.1 MPa, a tracción de 27.5 MPa, y un módulo de elasticidad de 3.1 GPa.

2.3. Reforzamiento

Los tabiques de los especímenes IM2 e IM3 fueron reforzados con varillas de fibra de vidrio. Esta técnica tiene ventaja en comparación con el uso de láminas de fibra de vidrio, ya que no se requiere preparar la superficie por métodos abrasivos (por ejemplo lanzar chorros de arena a la superficie del muro) para poner la superficie áspera y mejorar la adherencia entre las láminas y el muro. Además, la estética del muro es preservada, puesto que las varillas se colocan en el interior de las juntas horizontales. El diámetro de las varillas es limitado por el espesor de las juntas, las cuales son usualmente de 10 mm.

Las varillas son instaladas como sigue: 1) usando una amoladora se hace una ranura en el mortero, 2) luego se aplica una capa de epóxico, 3) se embute la varilla en la junta y 4) se enrasa el epóxico. Para asegurar una adherencia apropiada entre el epóxico y la albañilería, es necesario limpiar el polvo con aire comprimido antes de aplicar el epóxico. En la Figura 2 se ilustra algunos aspectos del proceso de reforzamiento.

3. PARTE 1: Ensayos de Carga Lateral Cíclica Coplanar

Los especímenes fueron ensayados a carga lateral cíclica controlando los desplazamientos horizontales. Para generar la carga lateral se utilizó un actuador dinámico, mientras que para fijar al espécimen sobre la losa de ensayo, se utilizaron 3 gatas hidráulicas. En la Figura 3a se muestra una vista general de los dispositivos utilizados, mientras que en la Figura 3b se indica la ubicación de los instrumentos ($D = LVDT$, $S = Strain Gauge$). Un total de 10 LVDT fueron utilizados para registrar los desplazamientos del espécimen. Cinco *strain gauges* fueron adheridos a las varillas de fibra de vidrio utilizadas en los especímenes IM2 e IM3.

Cada ensayo consistió de 8 fases de desplazamiento controlado. Los desplazamientos para las fases 1 a 8 fueron: 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 y 18.0 mm, respectivamente. La selección del máximo desplazamiento de 18 mm, estuvo basada en la máxima distorsión (0.7%) permitida por la Norma Sismorresistente E-030 (Ref.4) para edificaciones aporricadas.

3.1. Resultados Experimentales

En el espécimen RC-F, portico sin tabique, la primera fisura fue observada en la columna para un desplazamiento $D = 5.0$ mm. Al final del ensayo ($D = 18.0$ mm) el área fisurada en las columnas se extendía aproximadamente 100 cm desde la base. En la viga las fisuras se extendían 60 cm desde las caras de las columnas. No se observaron fisuras debajo de la unión viga-columna. Asimismo, las fisuras no abarcaron toda la sección transversal de las columnas.

En los especímenes con tabique IM1 e IM2, la primera fisura fue observada en el mortero colocado en la interfase pórtico-tabique para $D = 1.0$ mm. En el caso del espécimen IM3, esta fisura apareció en la interfase viga-tabique, mientras que la fisura en la interfase columna-tabique recién apareció para $D = 2.5$ mm, posiblemente esto se debió a que las varillas de fibra de vidrio de este espécimen anclaban en las columnas. Las primeras fisuras en los tabiques aparecieron para $D = 2.5$ mm y fueron escalonadas siguiendo las zonas de debilidad mortero-bloque. En las columnas de estos especímenes, las primeras fisuras se observaron en las caras exteriores para $D = 5$ mm. En general,

no se observaron fisuras en la viga, sin embargo, las columnas se fisuraron a lo largo de toda su altura, en los nudo viga-columna también se presentaron fisuras. En la Figura 4 se muestra las fisuras que se presentaron en los especímenes RC-F e IM2 después de finalizar los ensayos, los números indican las fases en que ocurrieron las fisuras.

En la Figura 5 se muestra la envolvente carga lateral vs. desplazamiento para los 4 especímenes ensayados en esta investigación. En esta figura se observa que la capacidad resistente del espécimen no reforzado IM1 empieza a decrecer para $D = 12.5$ mm (distorsión de 0.5%). Para $D = 18$ mm, la diferencia en la resistencia entre los especímenes reforzados (IM2 e IM3) y no reforzado (IM1) es 50%. Las gráficas de los especímenes IM2 e IM3 indican que la resistencia tiende a estabilizarse alcanzando distorsiones de 0.7% sin perder capacidad de carga lateral gracias a las varillas de fibra de vidrio.

En la Figura 6 se presenta la degradación de rigidez lateral de los especímenes. La rigidez se calculó dividiendo la carga lateral entre el desplazamiento correspondiente a cada fase del ensayo. En esta figura se observa que la rigidez elástica (fase 1) de los especímenes con tabique es aproximadamente 13 veces la del pórtico, mientras que en el rango inelástico (fase 8) esta diferencia es tres veces. Después de fisurarse los tabiques, la pérdida de rigidez es cerca de 45%. En la última fase del ensayo, se observa que la rigidez en los especímenes reforzados tiende a estabilizarse y es 60% mayor que la del espécimen no reforzado. De las Figuras 5 y 6 se deduce que la degradación de rigidez de los especímenes reforzados no fue acompañada por una degradación de resistencia similar. Contrariamente, la fisuración del tabique no reforzado no solo conlleva a la degradación de rigidez sino también de resistencia, lo cual eventualmente podría conducir a problemas de estabilidad cuando el muro se vea sujeto a cargas sísmicas perpendiculares al plano.

En la Figura 7 se presenta la acumulación de fisuras en las 6 hiladas centrales del tabique, medida por los LVDT diagonales. En esta figura se observa que la contribución de las varillas de fibra de vidrio es significativa a partir de la fase 6 ($D = 12.5$ mm), en esta fase los muros tuvieron una fisuración moderada y las fisuras acumuladas en los muros reforzados fue el 54% de las fisuras existentes en IM1. En los muros reforzados hubieron más fisuras, pero fueron mucho más finas que las existentes en IM1; para $D = 18$ mm, el grosor de la mayor fisura en IM2 e IM3 fue 5 mm, mientras que en IM1 fue 7.8 mm.

La deformación unitaria captada por los strain gauges en el area central osciló entre 5000 y 7000 μS (S1 and S2 en la Figura 3b), lo cual representa cerca del 30% de la resistencia última de las varillas de fibra de vidrio. En general fue observado que el refuerzo empezó a trabajar para desplazamientos laterales comprendidos entre 5.0 y 7.5 mm (fases 3 and 4, respectivamente).

4. PARTE II: Ensayo de Simulación Sísmica Perpendicular al Plano

Después de completar la Parte I, los especímenes fueron colocados en la mesa vibradora para someterlos a aceleraciones perpendiculares al plano del tabique. Se utilizó la señal correspondiente al terremoto del 31 de mayo de 1970 ocurrido en el Perú, con tres niveles de aceleración máxima:

- Fase 9: Sismo moderado. Aceleración nominal $A = 0.2g$
- Fase 10: Sismo severo sobre suelo duro. Aceleración nominal $A = 0.4g$
- Fase 11: Sismo severo sobre suelo blando. Aceleración nominal $A = 0.6g$

En este ensayo se utilizaron un total de 14 acelerómetros y 4 LVDT, evitando colocarlos sobre fisuras o juntas de mortero. Para simular el arriostramiento que proporciona la losa del piso en un edificio real, la viga fue arriostrada con un pórtico metálico anclado en la mesa vibradora, al igual que la cimentación del espécimen. La Figura 8 muestra una vista general de los dispositivos.

4.1. Resultados Experimentales

En general, no se formaron fisuras adicionales a las existentes en la Parte I. Durante las fases 10 y 11, sólo se desprendió un poco del mortero de las juntas en el espécimen IM1, mientras que este desprendimiento no ocurrió en IM2 e IM3.

El coeficiente sísmico C puede determinarse como $C = W/P$, donde W es la presión perpendicular al tabique y P es el peso del tabique por unidad de área. W fue calculado como $W = \sum F_i / \text{Area del Tabique}$, donde $\sum F_i$ es la suma de las fuerzas sísmicas ortogonales al tabique. Cada fuerza fue calculada como $F_i = a_i P A_{ti}$, donde a_i es la aceleración captada por el acelerómetro y A_{ti} es el área tributaria alrededor del acelerómetro respectivo. Los valores de C y la presión sísmica promedio se presentan en la Tabla 2 para cada espécimen.

En la Tabla 2 se puede observar que C y W son mayores en los tabiques reforzados. Adicionalmente, el valor experimental de C supera al coeficiente $C = 0.3$ calculado de acuerdo a la relación $C = ZUC1$ ($U=1$, $Z=0.4$, $C1=0.75$), especificada por la norma sismorresistente E-030 (Ref.4) para el diseño ante cargas perpendiculares al plano del tabique, esto se debe a la alta rigidez y resistencia ante acciones transversales que tuvieron los tabiques, por lo que no necesitarían reforzarse por flexión (refuerzo vertical). Sin embargo, para elementos que puedan precipitarse fuera de la edificación, como es el caso de los tabiques ubicados en la fachada de un edificio, en la Ref. 1 se especifica un valor de $C1=2$, con lo cual C es igual a 0.8, que resulta ligeramente mayor (14%) al alcanzado experimentalmente.

5. PARTE III: Ensayo de Carga Lateral Monotónica

La última parte de esta investigación consistió en la aplicación de una carga lateral monotónicamente creciente (Fase 12) a una velocidad de 1mm/min. Los dispositivos utilizados fueron similares a los empleados en la Parte I.

5.1. Resultados Experimentales

En la Figura 9 se muestra la variación carga-desplazamiento. El ensayo del pórtico RC-F fue detenido en $D = 85$ mm debido a una falla presentada en la cimentación, en este instante el refuerzo en las columnas estaba en fluencia, por lo que la carga de 124 kN registrada cuando se detuvo el ensayo no debería incrementarse más. Esta carga fue mayor que la resistencia calculada analíticamente, la cual fue 107.2 kN.

En el resto de especímenes, para $D = 70$ mm, los bloques y fragmentos del muro se dislocaron y rotaron independientemente. Los tabiques no colapsaron debido al confinamiento proporcionado por los pórticos, sin embargo, de haber existido en simultáneo cargas transversales al plano, los muros hubiesen colapsado. En los tabiques reforzados IM2 e IM3, para $D= 50$ mm, algunas varillas de fibra de vidrio ubicadas en la región central se doblaron debido a que fueron atravesadas por las fisuras diagonales (Figura 10a). Para $D = 70$ mm, algunas varillas de fibra de vidrio se pandearon saliéndose fuera del plano del muro (Figura 10b). Al final del ensayo, varios bloques se trituraron.

En relación a la Parte I, en la Figura 9 puede apreciarse que el espécimen IM2 tuvo un incremento de resistencia de 10%, mientras que el espécimen IM3 decreció su resistencia en 4%. Estas diferencias están dentro del rango estadístico y podrían atribuirse a la variabilidad de la albañilería.

En la Fig.11a se muestra al tabique no reforzado IM1 después de finalizar el ensayo, allí puede observarse la deformación permanente del pórtico

6. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones pueden derivarse de este programa experimental:

- Los especímenes reforzados con varillas de fibra de vidrio pueden alcanzar distorsiones de 0.7% sin perder su capacidad resistente a carga lateral. Para este nivel de distorsión, la resistencia de los tabiques reforzados fue 50% mayor que la del no reforzado, asimismo, la degradación de rigidez lateral de los muros reforzados no implica degradación de resistencia.
- Los tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio tuvieron una mayor cantidad de fisuras que el tabique no reforzado, pero estas fisuras fueron más finas.
- Para una distorsión de 0.7%, las deformaciones unitarias de las varillas oscilaron entre 5000 y 7000 μS , lo que representa el 30% de la deformación de rotura de estas varillas.
- Los resultados del ensayo de simulación sísmica transversal al plano de los tabiques previamente sometidos a distorsiones coplanares de 0.7%, indicaron que no se requería reforzarlos por flexión.
- En el ensayo monotónico, donde se aplicaron distorsiones superiores a 0.7% (hasta 6%), los bloques y fragmentos del muro se dislocaron y rotaron independientemente. El tabique no colapsó debido al confinamiento proporcionado por el pórtico, sin embargo, de haber existido en simultáneo cargas transversales al plano, los tabiques podrían haber colapsado.

Agradecimientos

Se agradece profundamente el soporte financiero dado por National Science Foundation (NSF) de los Estados Unidos de Norteamérica. Los autores también agradecen el soporte prestado por NSF Industry/University Cooperative Research Center en la Universidad de Missouri-Rolla y al Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Bibliografía

- [1] Schwegler, G., and P. Kelterborn, "Earthquake Resistance of Masonry Structures strengthened with Fiber Composites," Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996, 6 pp. CD-ROM.
- [2] Li, T., P.F. Silva, A. Belarbi, and J.J. Myers, "Retrofit of Un-Reinforced Infill Masonry Walls with FRP," CCC 2001 Composites in Construction, Porto, Portugal, October 10-12 2001. 6 pp.
- [3] Tumialan, J.G., A. Morbin, A. Nanni, and C. Modena, "Shear Strengthening of Masonry Walls with FRP Composites," COMPOSITES 2001 Convention and Trade Show, Composites Fabricators Association, Tampa, FL, October 3-6, 2001, 6 pp. CD-ROM.
- [4] Ministerio de Transporte, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, "Diseño Sismorresistente", Norma Técnica de Edificación E-030, Lima, Octubre de 1997.

Tabla 1. Matriz de Ensayos

Espécimen	Descripción
RC-F	Pórtico sin tabique
IM1	Tabique no reforzado
IM2	Tabique reforzado con varillas de fibra de vidrio de ¼" no ancladas
IM3	Tabique reforzado con varillas de fibra de vidrio de ¼" ancladas al pórtico

Table 2. Resultados de la Parte II

Espécimen	Coefficiente sísmico, C	Presión promedio ortogonal al plano, W
IM1	0.69	11.2 kPa
IM2	0.76	13.8 kPa
IM3	0.72	13.0 kPa

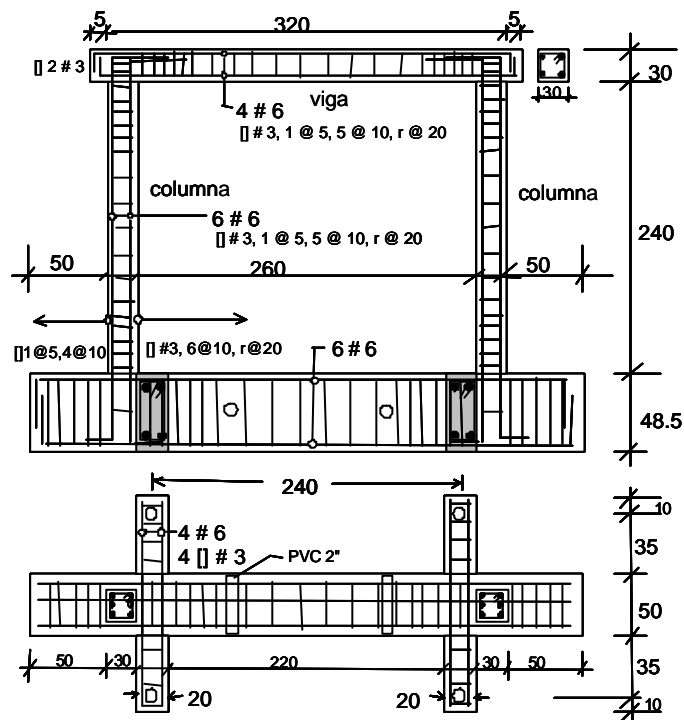


Fig. 1. Dimensiones (cm) y refuerzo del pórtico de concreto armado.



(a) Aplicación de la pasta de epóxico

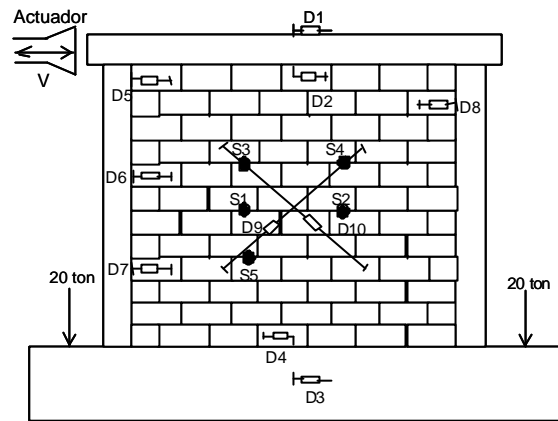


(b) Instalación de las varillas de fibra de vidrio

Fig 2. Proceso de reforzamiento (especímenes IM2 e IM3)



(a) Vista general del ensayo



(b) Ubicación de los instrumentos

Fig. 3. Ensayo de Carga Lateral Cíclica Coplanar – Parte I y Parte III



(a) Fisuras en columnas - Espécimen RC-F



(b) Fisuración en tabiques - Espécimen IM2

Fig. 4. Patrón de Fisuración

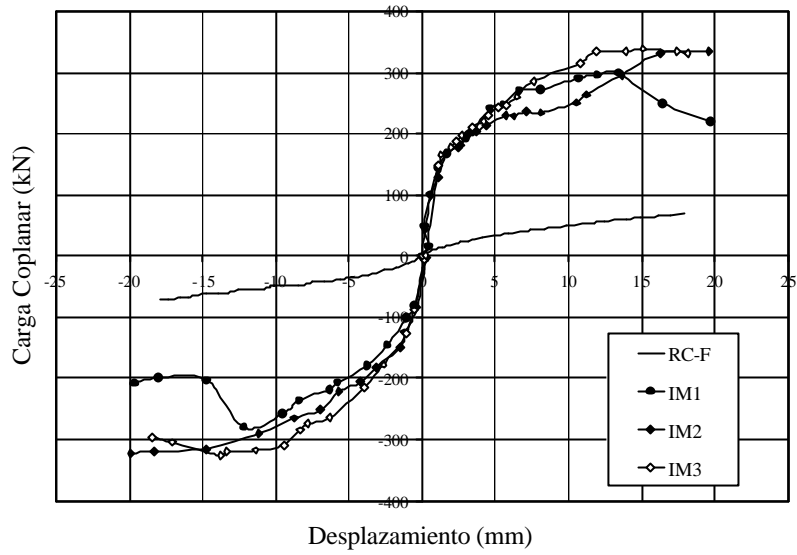


Fig. 5. Envolvente Carga Lateral - Desplazamiento

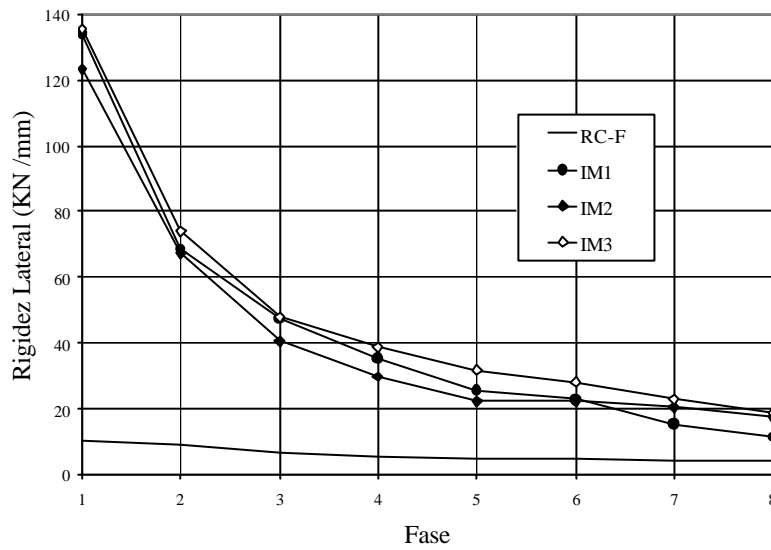


Fig.6. Rigidez lateral en cada fase del ensayo.

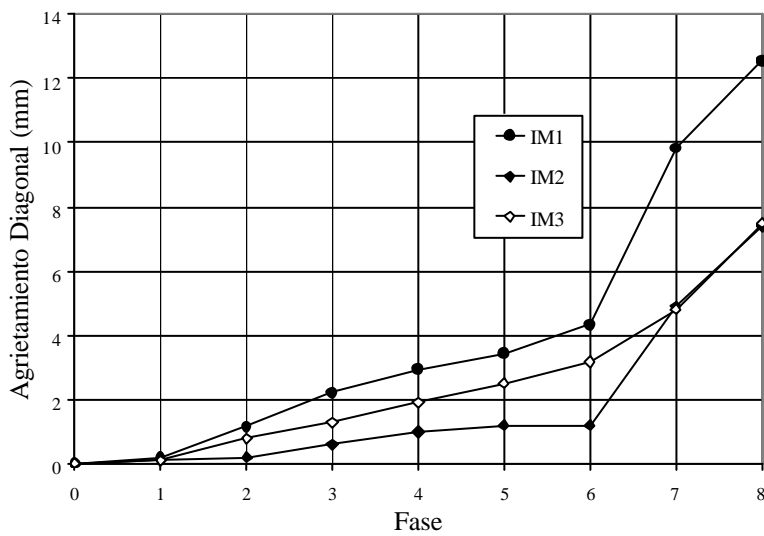


Fig. 7. Acumulación de fisuras



Fig. 8. Vista general del ensayo sísmico – Parte II

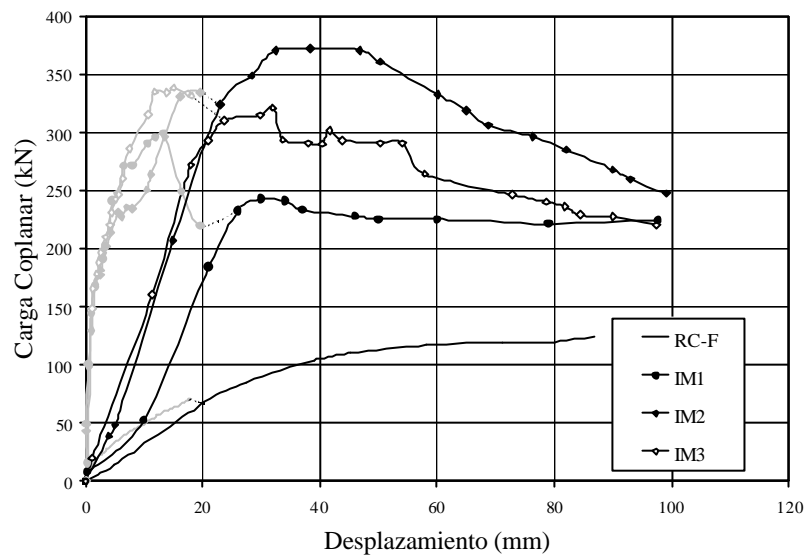


Fig. 9. Carga-Desplazamiento. Parte III

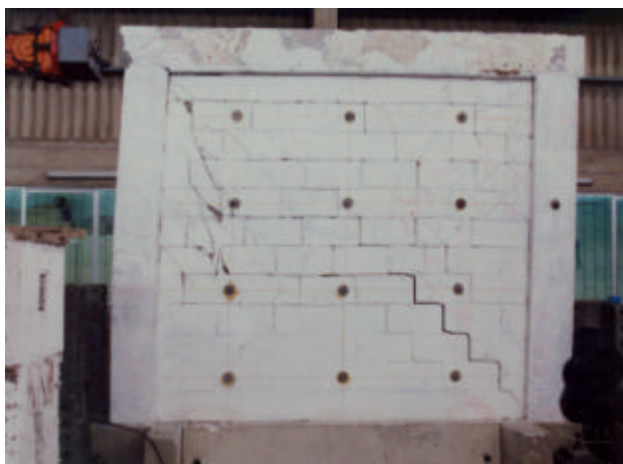


(a) Varillas dobladas



(b) Varilla pandeada

Fig.10. Fallas en las varillas de fibra de vidrio.



(a) Tabique no reforzado – IM1



(b) Tabique reforzado – IM2

Fig.11. Especimenes IM1 e IM3. Parte III.