

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UN PÓRTICO DE ALBAÑILERÍA ARMADA CONSTRUIDO CON BLOQUES DE CONCRETO VIBRADO

Por: Ángel San Bartolomé, Alejandro Muñoz y Dante Chumpitazi
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Este proyecto fue parcialmente financiado por Firth Industries del Perú y tuvo como objetivo estudiar el comportamiento sísmico de un pórtico de albañilería armada a escala natural, compuesto por bloques de concreto vibrado rellenos con grout. El espécimen fue ensayado a carga lateral cíclica en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica y los resultados experimentales (rigidez, resistencia, mecanismo de falla, etc.) fueron comparados con los obtenidos teóricamente.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se viene utilizando la albañilería armada con bloques de concreto vibrado como sistema estructural en los edificios, sin embargo, la estructura no sólo requiere de muros sino también, algunas veces, de pórticos que por lo general en nuestro medio son hechos de concreto armado, perdiéndose así la armonía arquitectónica cuando la construcción es caravista. De esta manera, se construyó un pórtico de albañilería armada a escala natural, el cual fue sometido a una prueba de carga lateral cíclica con el objeto de saber si su respuesta sísmica era predecible.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN

El pórtico simula una edificación de un solo piso y carece de carga vertical (excepto su peso propio). Las dimensiones geométricas del pórtico se muestran en la Fig.1, mientras que el refuerzo empleado aparece en las Figs.2. y 3. Cabe resaltar que en el nudo 1 (Fig.1), la viga empieza con un bloque entero y una junta vertical a diferencia del nudo 2. Asimismo, en la primera hilada correspondiente a la viga se utilizaron bloques normales, cuando por lo general en esta hilada se utiliza bloques con sección transversal en forma de U, a fin de que la viga quede caravista.

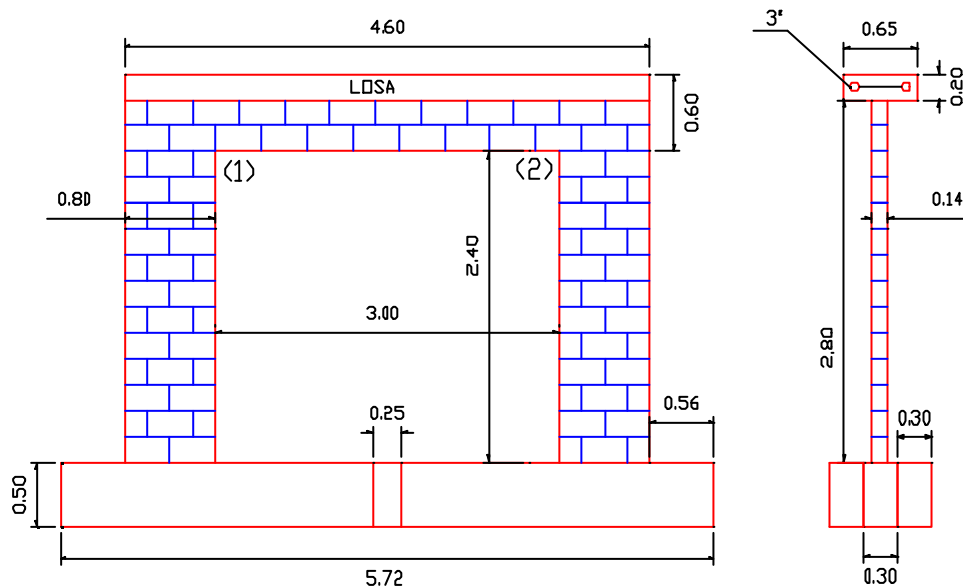


Fig. 1. Características geométricas del pórtico (medidas en metros)

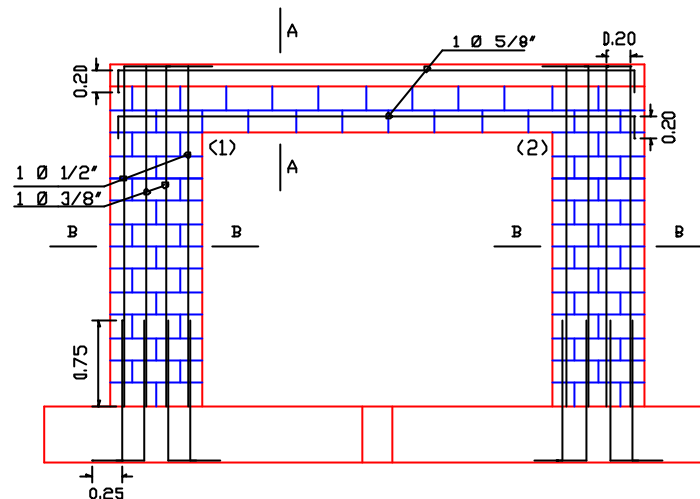


Fig.2. Refuerzo en la Albañilería

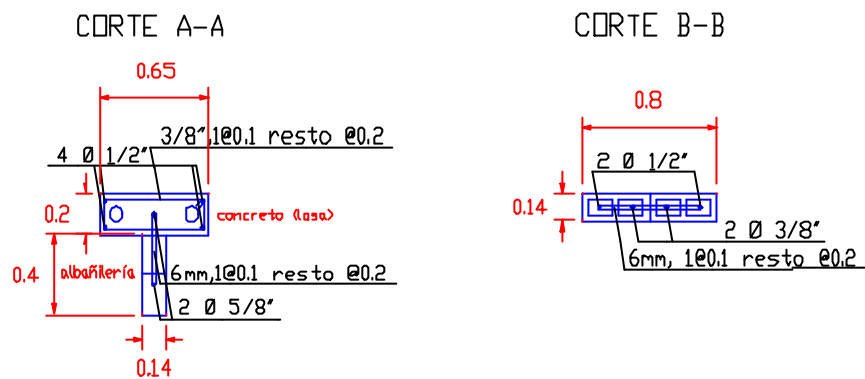


Fig.3. Cortes A-A y B-B en la Fig.2

3. CONSTRUCCIÓN DEL PÓRTICO

3.1. Características de los Materiales

La resistencia a compresión axial de los bloques fue $f_b = 60 \text{ kg/cm}^2$, sobre área bruta. Las dimensiones de los bloques enteros fueron $39 \times 19 \times 14 \text{ cm}$, y los alvéolos cubrían el 35% del área bruta. En las juntas, de 1 cm de espesor, se utilizó "Mortero Fácil" (embolsado), al cual hubo que añadirle cal hidratada y normalizada para formar una proporción en volumen de 1: 1/2: 4 (cemento: cal: arena). Para rellenar los alvéolos se utilizó "Concreto Fácil" (grout embolsado) con proporción volumétrica 1: 2 1/2: 1 1/2 (cemento: arena: confitillo), con un slump de 10 pulgadas y una resistencia a compresión igual a 140 kg/cm^2 . Las pilas de albañilería estuvieron compuestas por 3 bloques rellenos con grout y su resistencia característica a compresión axial fue $f_m = 82 \text{ kg/cm}^2$. Para la losa existente sobre la viga de albañilería y también en la cimentación, se utilizó concreto convencional con resistencia $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

3.2. Procedimiento de Construcción

Se construyó la viga de cimentación dejando espigas (dowells, Foto 1) que posteriormente se empalmaron 75 cm con el refuerzo vertical de las columnas, estas espigas se ubicaron en el centro de los alvéolos correspondientes a los bloques (Foto 2). Adicionalmente, la superficie superior de la cimentación fue rayada en la zona donde se ubican las columnas de albañilería.



Foto 1. Encofrado de la viga de cimentación. Se aprecian las espigas.



Foto 2. Asentado de la primera hilada. Nótese que el mortero sólo cubre los bordes del bloque.



Foto 3. Registros de limpieza en la primera hilada.

3.2.1. Asentado de los Bloques

Antes de asentar la primera hilada, la superficie superior de la cimentación se limpió y humedeció. Los bloques se asentaron en su estado natural (secos). Los bloques de la primera hilada fueron recortados para formar ventanas (Foto 3) que permitan la limpieza del mortero que caía a través de los alvéolos durante el asentado. El mortero de las juntas horizontales se colocó sobre los bordes longitudinales de la hilada inferior. Instantes antes de asentar al bloque, se aplicó una franja de mortero en cada borde de una de las tapas extremas, para formar de este modo la junta vertical. Todas las juntas fueron bruñadas. El proceso de asentado constó de 3 jornadas de trabajo: la construcción hasta 1.2 m de altura de las 2 columnas, la construcción de la mitad superior de ambas columnas, y la construcción de la viga.

3.2.2. Vaciado del Concreto Líquido (Grout)

Los registros de limpieza se sellaron empleando los retazos provenientes del bloque recortado, para luego encofrarlos con una tabla. La operación de llenado se realizó al día siguiente de terminar el asentado de la última hilada de la viga de albañilería (Foto 4). El concreto líquido se vació en dos etapas con un intervalo de espera de 30 minutos entre ellas. En la primera etapa se llenó hasta 1.4 m de altura en las dos columnas, compactando el grout en capas de aproximadamente 30 cm de altura mediante una varilla de acero lisa de 1/2" de diámetro. Luego del intervalo de espera, se rellenó la mitad superior del pórtico, empleando la técnica de compactación descrita, dejándose 10 cm libres por debajo del nivel superior de la viga de albañilería, con la finalidad de que el concreto de la losa se engrape con la viga de albañilería formando llaves de corte que permitan transmitir la carga lateral desde la losa hacia el pórtico.



Foto 4. Pórtico antes de ser rellenado con grout.

4. TÉCNICA DE ENSAYO

El ensayo realizado fue de carga lateral cíclica con una amplitud del desplazamiento lateral de la losa controlado en 12 fases (Tabla 1). La carga se aplicó sobre la losa del pórtico mediante un actuador dinámico fijo a un marco de reacción (Foto 5). El número de ciclos por fase fue determinado observando el gráfico carga-desplazamiento que se producía en tiempo real durante el ensayo. La velocidad de ensayo fue 4 minutos por ciclo.

Tabla 1. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
0.25mm	0.5mm	1.0mm	2.0mm	3.0mm	5.0mm
Fase 7	Fase 8	Fase 9	Fase 10	Fase 11	Fase 12
7.5mm	10.0mm	12.5mm	15.0mm	17.5mm	20.0mm



Foto 5. Vista global de los dispositivos de ensayo.

5. ANÁLISIS TEÓRICO

El pórtico se modeló como un sistema de barras deformables por flexión, carga axial y fuerza cortante, añadiendo brazos rígidos en los nudos 1 y 2 (Fig.1) y empotrando la base de las columnas (Fig.5). Para la albañilería se utilizó un módulo de elasticidad $E_a = 700 \text{ f'm}$ y un módulo de corte $G_a = 0.4 E_a$ (Ref.1), mientras que para la losa de concreto se empleó $E_c = 2'000,000 \text{ ton/m}^2$ y $G_c = E_c / 2.3$. Como la viga de albañilería incluía una losa de concreto, hubo que aplicar el criterio de la sección transformada, amplificando el ancho real de la losa por la relación E_c / E_a .

Sobre el modelo mencionado, y utilizando el programa EDIFICIO (Ref.2), se aplicó una carga lateral, la que dividida entre el desplazamiento horizontal, permitió hallar la rigidez lateral del pórtico, así como las fuerzas internas. Para calcular las cargas laterales asociadas a las fisuras de tracción por flexión, se igualó el máximo esfuerzo actuante en tracción (calculado con las fórmulas de flexión compuesta, incluyendo el peso del espécimen) a la resistencia a tracción por flexión que para la albañilería fue asumida como 10 kg/cm^2 y para la losa de concreto fue estimada en 30 kg/cm^2 .

Asumiendo que el refuerzo longitudinal ("As" en la Fig.4) estaba en fluencia ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$) y utilizando un procedimiento similar al empleado con las secciones de concreto armado, pero cambiando f'_c por f'_m , se pudo calcular el momento plástico en la columna de albañilería (M_p , en este caso se despreció el peso propio), mientras que para la viga se tuvo en cuenta que ella estaba compuesta por dos materiales y que el refuerzo total en cada extremo (losa y albañilería) era diferente.

Para determinar el mecanismo de falla y la secuencia de formación de las rótulas plásticas, se utilizó el programa EDIFICIO sometiendo al pórtico a incrementos de cargas (Fig.5), variando el modelo matemático conforme se presentaba una rótula plástica. La carga máxima se obtuvo sumando los incrementos de carga. Como conclusión de la parte teórica se obtuvo que la primera rótula plástica se iba a formar en la base de la columna y las siguientes aparecerían en la base de la viga.

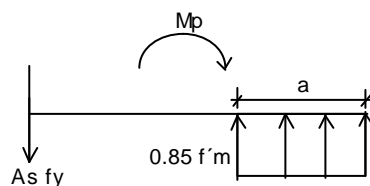


Fig.4. Cálculo del momento plástico M_p .

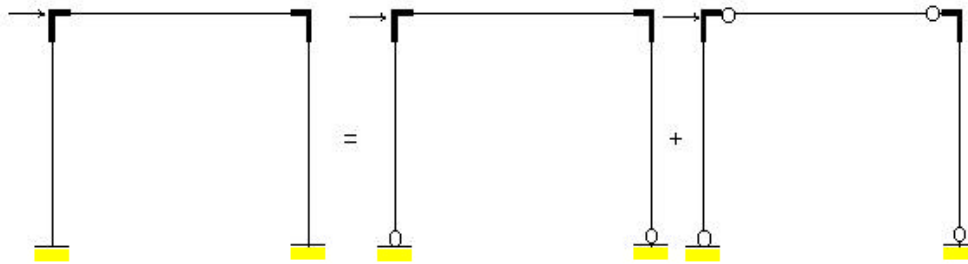


Fig.5. Secuencia de formación de las rótulas plásticas.

6. RESULTADOS DEL ENSAYO y COMPARACIÓN CON LOS VALORES TEÓRICOS

6.1. Rigidez Lateral Inicial (K_0)

El valor de K_0 obtenido experimentalmente fue 3.03 ton/mm y difirió 9% respecto al valor teórico (2.78 ton/mm), esto permite afirmar que los parámetros elásticos especificados en la Ref.1: $E_a = 700 \text{ f'm}$ y $G_c = 0.4 E_c$, son adecuados.

6.2. Fisura de Tracción por Flexión

En la Tabla 2 aparecen los valores teóricos y los experimentales correspondientes al instante en que surgieron las fisuras de tracción por flexión en las bases de la columna y de la viga.

Tabla 2. Fuerza Cortante (V) y Desplazamiento Lateral (D) en la Fisura por Flexión

Elemento	Valores Teóricos		Valores Experimentales	
	V (ton)	D (mm)	V (ton)	D (mm)
Columna	2.22	0.80	1.00	0.33
Viga	2.52	0.91	3.69	1.96

Teóricamente se esperaba que primero fisure la columna y después la viga, lo cual se cumplió experimentalmente, sin embargo, la columna fisuró para una carga muy pequeña y la viga lo hizo para una carga por encima del valor esperado. Para el caso de la viga la diferencia se explica debido a que sobre ella se aplicó una precompresión en el tirante que la atravesaba (dispositivo de ensayo, Foto 5), pero en la columna la única explicación es que la albañilería haya tenido una resistencia a tracción por flexión muy baja ($f'_t = 3.7 \text{ kg/cm}^2$) con relación al valor asumido (10 kg/cm^2), proveniente del ensayo de muros.

6.3. Falla por Deslizamiento

La falla por deslizamiento se caracterizó por ser una grieta horizontal localizada en la base de las columnas en la interfase bloque-mortero (Foto 6), por lo que el refuerzo horizontal no fue efectivo. Esta falla fue una derivación de las fisuras de flexión formadas en ambos extremos de la columna que terminaron uniéndose ante el incremento de la sollicitación cíclica.

El deslizamiento se produjo durante la Fase 9, para una carga lateral de 9.07 ton y un desplazamiento de 12.5 mm. Como a partir de este instante hubo peligro de estabilidad lateral ante acciones transversales, y además como esta falla no fue prevista, se considerará que el espécimen tuvo un comportamiento adecuado hasta el instante en que se formó la falla por deslizamiento.



Foto 6. Deslizamiento en la base producido en la Fase 9.

6.4. Resistencia Máxima

En el Gráfico 1 se muestra los lazos histeréticos cortante-desplazamiento, mientras que el Gráfico 2 corresponde a la envolvente del Gráfico 1. Durante el experimento siempre existió un incremento de la sollicitación, por lo que se ha considerado que la resistencia máxima corresponde al instante en que se produce la falla por deslizamiento en la base de las columnas (ver 6.3). Esta falla se produjo en la Fase 9 para una carga lateral de 9.07 ton, asociada a un desplazamiento de 12.5 mm.

Gráfico 1. Lazos Histeréticos

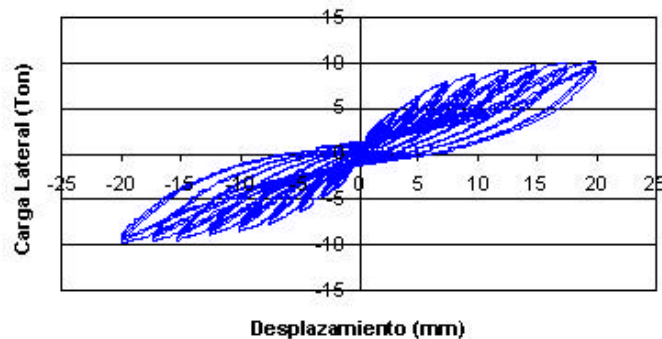
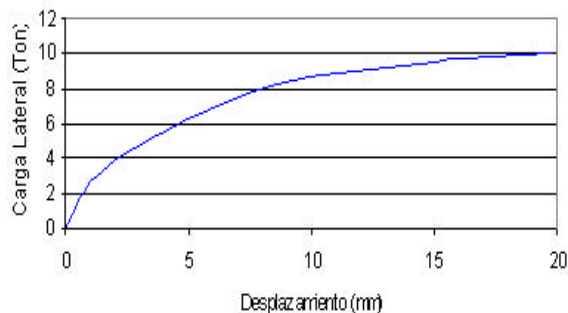


Gráfico 2. Envolvente de los Lazos Histeréticos



La carga lateral teórica asociada al mecanismo de falla por flexión (Fig.5) fue 7.03 ton, valor que difiere 12% respecto al resultado experimental (8 ton). Esta diferencia es explicable porque en el cálculo teórico no se contempló la incursión del refuerzo vertical (Fig.4) en su zona de endurecimiento, lo que eleva la resistencia.

6.5. Patrón de Grietas y Secuencia de Fallas

En la Figura 6 se muestra el patrón de grietas del espécimen (el número anotado corresponde a la fase en que se formó la fisura). Se puede apreciar que las fases donde se produjeron más fisuras son la 7 y 8 que antecedieron a la falla por deslizamiento. La rótula plástica se formó en la base de las columnas en las fases 4 y 5, mientras en las bases de las vigas las rótulas se formaron durante las fases 5 y 6, cumpliéndose de esta manera la secuencia de fallas esperadas (acápite 5).

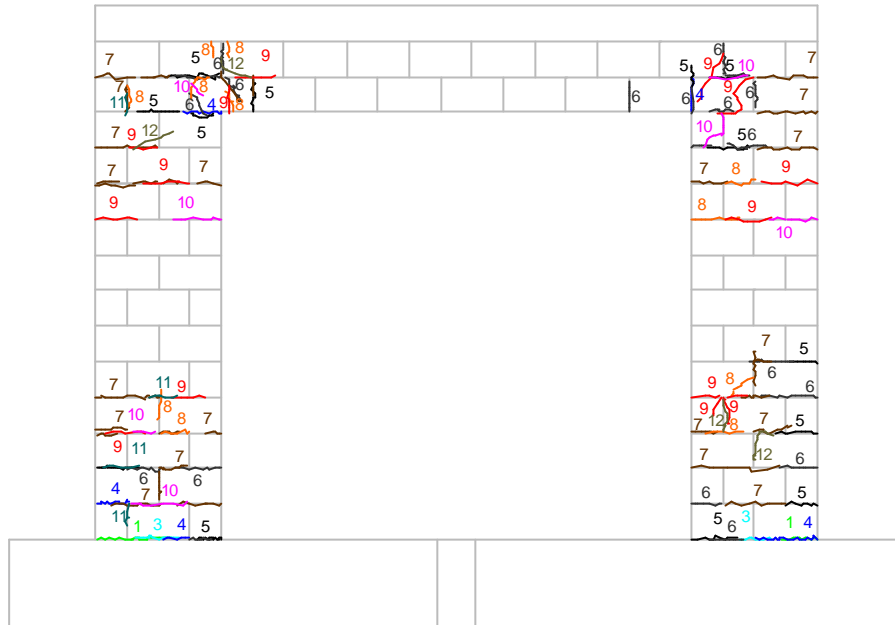


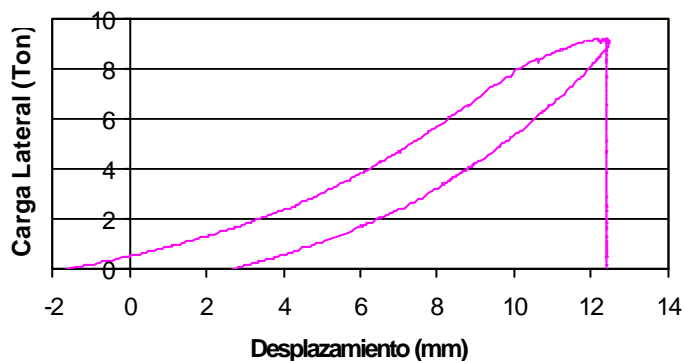
Fig.6. Patrón de Grietas.

6.6. Coeficiente de Reducción de la Fuerza Sísmica (R)

El criterio para calcular el coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas (R), fue el de igualar la energía elástica equivalente (proporcionada por una carga V_e en la zona con rigidez inicial K_0) a la energía inelástica (E_h) correspondiente al instante donde se formó la falla por deslizamiento (Gráfico 3). Este criterio aparece en la Ref.3 y contempla la degradación de la rigidez lateral, de esto se obtiene:

$$R = V_e / V_r = \sqrt{(2 K_0 E_h) / V_r}$$

Gráfico 3. Cálculo de la energía inelástica (E_h) en la Fase 9.



La energía inelástica E_h , calculada del Gráfico 3, resultó 56.73 ton-mm, por lo que siendo $K_0 = 3.03$ ton/mm (ver 6.1), se obtiene una carga elástica equivalente $V_e = 18.54$ ton. Por otro lado, la carga

correspondiente a la formación del mecanismo de falla por flexión fue $V_r = 8$ ton, por lo que el factor R resulta $R = 18.54 / 8 = 2.3$. Este valor es similar a los obtenidos en los muros de albañilería (Ref.3).

6.7. Deriva Máxima

El desplazamiento lateral asociado a la falla por deslizamiento fue 12.5 mm, por otro lado, la altura del espécimen medido desde la base de las columnas hasta el eje del actuador fue igual a 2.9 m, con lo cual la deriva permitida sería $0.0125 / 2.9 = 0.0043$ ó $43 / 1000$, este resultado es similar al especificado en la Norma Sísmica (Ref.4) para los muros de albañilería reforzados.

7. CONCLUSIONES

- La resistencia a tracción por flexión de la albañilería, resultó 3.7 kg/cm^2 . Esta resistencia es muy baja y podría deberse a la escasa adherencia bloque-mortero-grout, este aspecto debe mejorarse, de lo contrario es posible que esta falla se presente ante la acción de sismos leves (en este experimento se presentó para un desplazamiento de 0.33 mm).
- La succión de los bloques fue elevada ($20 \text{ gr/200cm}^2\text{-min}$), por lo que para mejorar la adherencia bloque-mortero se recomienda humedecer la superficie de asentado de los bloques. Para mejorar la adherencia grout-cimentación se sugiere humedecer la cimentación antes de vaciar el grout. Con estas recomendaciones debería incrementarse la resistencia a tracción por flexión de la albañilería.
- Empleando los parámetros elásticos especificados en la Ref.1 ($E_a = 700 \text{ f}^m$, $G_a = 0.4 E_a$), se pudo estimar con 9% de error la rigidez lateral inicial del espécimen.
- Se cumplió en orden el mecanismo de falla por flexión esperado, es decir, primero rotularon las bases de las columnas, luego rotuló la base de la viga en la unión con la columna, sin embargo, para un desplazamiento de 12.5 mm, las fisuras que por flexión se habían formado en cada extremo de las columnas, se unieron dando lugar a una falla por deslizamiento.
- El coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (R) y la deriva máxima (ambos asociados al instante que se inició falla por deslizamiento), fueron similares a los valores que se proporcionan en la Ref.3 para los muros de albañilería reforzada y estuvieron lejos de alcanzar los valores que se proporcionan en la Ref.4 para los pórticos de concreto armado.

8. LINEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

- Estudiar la manera de evitar o de retardar la falla por deslizamiento, por ejemplo, empleando un refuerzo vertical diseñado para absorber el momento flector y la fuerza cortante (cizalle) en simultáneo.
- Estudiar el comportamiento de un pórtico de albañilería armada sometido en simultáneo a carga vertical constante y a carga lateral cíclica.

9. REFERENCIAS

1. Proyecto de Normas Técnicas de Edificación E-070. Angel San Bartolomé. Documento en revisión por el Comité de Albañilería-SENCICO.
2. Análisis de Edificios. Angel San Bartolomé. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1999.
3. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Angel San Bartolomé. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1998.
4. Normas Técnicas de Edificación E-030 – Diseño Sismorresistente