

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA VIGA DE ALBAÑILERÍA Y UNA VIGA DE CONCRETO

Por: Ángel San Bartolomé y Fabián Portocarrero
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Con el financiamiento parcial de la compañía Firth Industries del Perú, se construyeron dos vigas empleándose la misma geometría y la misma cuantía de refuerzo longitudinal, con la diferencia que una fue hecha de albañilería con bloques de concreto vibrado y la otra fue hecha de concreto. Estas vigas representaban a un dintel que conectaba a dos muros y fueron ensayadas a carga lateral cíclica en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica para comparar el comportamiento estructural.

1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país se acostumbra emplear vigas dinteles de concreto armado en las construcciones de albañilería, estos dinteles resultan antiestéticos cuando las edificaciones son de albañilería armada caravista, sin embargo, como se desconoce el comportamiento estructural de los dinteles de albañilería y su grado de eficacia con relación a las vigas tradicionales de concreto, se realizó este proyecto.

El prototipo correspondía a una viga dintel que conectaba a dos muros (Fig.1) y en donde se estimó la posición del punto de inflexión al centro de su longitud, por lo que los especímenes fueron ensayados a carga lateral cíclica “V” como elementos en voladizo, controlándose los desplazamientos “D”, pero sin contabilizar el efecto del giro por flexión de los muros (θ). Con fines comparativos, ambas vigas (Fig.2) tuvieron la misma sección transversal (14x60 cm), la misma longitud (1 m), la misma edad (28 días) y la misma área de acero del refuerzo por flexión (2 cm^2 : 1 ϕ 5/8" en la albañilería y 4 ϕ 8 mm en el concreto).

2. MATERIALES EMPLEADOS

- Unidad de Albañilería. Se utilizaron bloques industriales de concreto vibrado de 14 cm de espesor.
- Mortero. La proporción volumétrica cemento-cal-arena utilizada fue 1: $\frac{1}{2}$: 4.
- Concreto Líquido (Grout). La proporción volumétrica cemento-arena-confitillo fue 1: $\frac{2}{3}$: $\frac{1}{2}$ con 10 pulgadas de slump.
- Cal. La cal utilizada fue aérea, hidratada y normalizada.
- Cemento. Se utilizó cemento portland tipo I.
- Acero de Refuerzo. Se utilizó acero corrugado, de grado 60.

3. CONTROL DE MATERIALES

3.1. Concreto Líquido. Empleando como moldes a los bloques (Foto 1), se prepararon 4 probetas con una sección transversal de 3"x3" y una altura de 6 ". Estas probetas se ensayaron a los 28 días de edad con una velocidad de carga de 5 ton/min (Foto 2), obteniéndose $f'c = 147 \text{ kg/cm}^2$.

3.2. Pilas de Albañilería. Se construyeron 2 pilas compuestas por 3 bloques de concreto vibrado, con las celdas llenas con grout. La sección transversal fue de 14x39 cm y la altura fue 59 cm. El ensayo de compresión axial (Foto 3) proporcionó una resistencia promedio igual $f'm = 79 \text{ kg/cm}^2$. La falla observada en las pilas fue una grieta vertical seguida del desprendimiento de las caras laterales de los bloques y, finalmente, se trituró el grout.

3.3. Concreto. El ensayo de compresión axial realizado sobre 3 probetas estándar extraídas de la viga de concreto, proporcionó una resistencia $f'c = 294 \text{ kg/cm}^2$.

3.4. Acero de Refuerzo. Se realizaron ensayos de tracción (Foto 4), a una velocidad de 10 mm/min entre los cabezales de la máquina universal, en barras de 40 cm de longitud utilizadas como refuerzo por flexión en las vigas de albañilería y de concreto. Los resultados aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayo de Tracción del Refuerzo Longitudinal				
Diámetro	Área (cm ²)	Esf. Máx. (kg/cm ²)	Esf. Fluencia fy (kg/cm ²)	Refuerzo en Viga de:
5/8"	2.00	6958	4492	Albañilería
8 mm	0.50	7419	4965	Concreto

4. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA

Empleando un bloque rectangular de compresiones, con un esfuerzo de $0.85f'_c$ para la viga de concreto y $0.85f'_m$ para la de albañilería, y suponiendo que el refuerzo longitudinal fluía con un esfuerzo nominal $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, se calculó el momento plástico para luego, por equilibrio, determinar las fuerzas cortantes asociadas que resultaron: 4.09 ton para la viga de concreto y 3.85 ton para la de albañilería; los estribos (Fig.2) eran capaces de resistir estas fuerzas, por lo que la falla debería ser por flexión.

5. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Los especímenes (Fig.2) estuvieron compuestos por una base que sirvió para conectar la viga contra la losa de ensayo y por una corona que sirvió para transferir la carga lateral hacia la viga. Tanto la base como la corona fueron de concreto armado.

5.1. Viga de Albañilería

Se fabricó un encofrado que sirvió de base a la viga de albañilería, luego se asentó la primera hilada compuesta por 5 bloques U (Foto 5), empleándose mortero en las juntas de espesor 1 cm. Después se colocó el primer fierro longitudinal (5/8") con todos los estribos previamente habilitados. En la segunda hilada se utilizaron bloques convencionales de tal forma que los estribos pasaban por las celdas (Foto 6). Luego se asentó la tercera hilada haciendo una abertura en los bloques donde se alojó el refuerzo longitudinal superior (Foto 7). Se esperaron dos días para el vaciado del concreto líquido, aunque en realidad este vaciado pudo hacerse al día siguiente de haberse concluido la albañilería. Este concreto se compactó con una varilla de madera, los detalles pueden apreciarse en las Fotos 5 a 9.

5.2. Viga de Concreto

Después de la habilitación del refuerzo (Foto 10), se encofró la base, la corona y la viga como si fuese una sola unidad, de tal modo de evitar juntas de construcción. Para la preparación del concreto se utilizó una mezcladora y para compactarlo se usó un vibrador de aguja. El desencofrado se realizó al día siguiente, y luego el concreto fue curado aplicando agua una vez al día, durante 5 días.

5.3. Metrado de Materiales y Costos

Con fines comparativos se realizó un metrado de los materiales que componen a cada viga, excluyendo la base y la corona, para determinar el costo respectivo. Como resultado se obtuvo que la viga de albañilería era 12% más costosa que la viga de concreto, sin considerar la mano de obra ni los acabados.

6. ENSAYO DE LAS VIGAS

El ensayo de ambas vigas fue de carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal (D en la Fig.2) controlado. Para generar la carga lateral (V) se utilizó un actuador dinámico (Foto 11), mientras que los desplazamientos fueron medidos con LVDT. Se aplicaron ciclos de carga y descarga en 12 fases (Tabla 2 y Fig.3), dándose en cada fase un número variable de ciclos (entre 2 y 3) hasta estabilizar el lazo histerético. Al final se realizó un ensayo armónico con una amplitud $D = 15 \text{ mm}$ y 2 Hertz de frecuencia.

Tabla 2. Fases del Ensayo de Carga Cíclica con Desplazamiento Controlado												
Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (mm)	0.25	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0

7. RESULTADOS

7.1. Rígidez Inicial. La rígidez lateral “ $K_o = V / D$ ”, es una medida indirecta de la rígidez flexural “ EI ” de las vigas, este valor se calculó en el primer ciclo, donde aún no se habían presentado fisuras, obteniéndose: K_o (viga de albañilería) = 3.8 ton/mm y K_o (viga de concreto) = 6.5 ton/mm. Por lo que en el rango elástico la viga de concreto fue 1.7 veces más rígida que la de albañilería.

7.2. Fisura de Tracción por Flexión. Las cargas asociadas a la primera fisura de tracción por flexión fueron: V (viga de albañilería) = 1.2 ton y V (viga de concreto) = 1.6 ton; con las cuales se calculó la resistencia a tracción por flexión, obteniéndose 15.7 kg/cm^2 para la viga de albañilería y 20.9 kg/cm^2 para la de concreto, por lo que se deduce que la viga de concreto es 33% más resistente.

7.3. Capacidad Máxima. En la Tabla 3 se presenta la carga máxima alcanzada por cada viga. Allí puede notarse que la viga de concreto fue 27% más resistente que la de albañilería.

Tabla 3. Capacidad Resistente y Desplazamientos Asociados		
	Viga de Albañilería	Viga de Concreto
Capacidad Resistente (ton)	5.5	7.0
D (mm)	20.3	17.3
Fase	12	11

7.4. Forma de Falla. Ambas vigas tuvieron una falla por flexión (Fotos 12 y 13), que en la Fase 6 ($D = 5 \text{ mm}$) se transformó en un deslizamiento a través de la base y finalmente, los talones fallaron por flexocompresión, haciendo más notoria la trituración en la viga de concreto (Foto 14), debido que se habían formado espacios vacíos entre las barras longitudinales puestas en paquetes de 2 varillas.

7.5. Capacidad de Absorción de Energía Inelástica. Este valor se calculó como el área bajo la curva V-D en la Fase 6, asociada al instante en que se inició el deslizamiento, obteniéndose 16 ton-mm para la viga de concreto y 7.5 ton-mm para la de albañilería, por lo que la viga de concreto tuvo 113% mayor capacidad de absorber energía inelástica.

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se vierten a continuación tienen por limitación que en el espécimen no se contempló el giro que existe en los extremos de un dintel real (θ en la Fig.1), asimismo, el refuerzo longitudinal de la viga de concreto se había colocado en paquete de dos barras, produciéndose vacíos en el espacio existente entre las varillas, aún así, la viga de concreto tuvo mejor comportamiento estructural que la viga de albañilería, pero esto no es motivo para descartar a la viga de albañilería.

- La viga de concreto fue 71% más rígida que la de albañilería, y 27% más resistente. Además, la viga de concreto tuvo una resistencia a tracción por flexión 33% mayor que la viga de albañilería y absorbió mayor energía inelástica (113% más).
- La resistencia máxima alcanzada por la viga de concreto superó en 71% al valor teórico correspondiente a la fluencia, mientras que para la viga de albañilería el porcentaje fue de 43%; esto principalmente se debe a que el refuerzo trabajó en la zona de endurecimiento, por lo que en el diseño de los estribos debe contemplarse este hecho, para que la viga no falle por corte.
- A partir de la Fase 6, la falla por flexión se transformó en una falla por deslizamiento en ambas vigas, esta forma de falla debe evitarse por resultar peligrosa, ya que en este caso, el refuerzo longitudinal debería absorber la fuerza cortante. En la viga de concreto el refuerzo empleado correspondía a la cuantía mínima especificada por la Norma Peruana E-060, por lo que se sugiere emplear más bien el refuerzo mínimo especificado por el ACI (mayor que el de la Norma E-060), y en la viga de albañilería se sugiere trabar su extremo, empotmando los bloques al interior de los muros, estas sugerencias deberán ser previamente estudiadas en forma experimental.

- La viga de albañilería resultó ser 12% más costosa que la de concreto (costo de materiales y encofrados, no se incluye la mano de obra ni los acabados). Cabe destacar que en la construcción de la viga de albañilería debe emplearse una mano de obra especializada, a diferencia de la viga de concreto; sin embargo, la viga de albañilería no necesita tarajearse.

9. REFERENCIAS

1. Construcciones de Albañilería. Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Angel San Bartolomé. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial – 1994.
2. Reinforced Masonry Engineering Handbook. Clay and Concrete Masonry. James E. Amrhein. Masonry Institute of America (Fifth Edition). Los Angeles USA – 1998.



Foto 1. Moldeado del Grout



Foto 2. Compresión del Grout



Foto 3. Compresión Axial de Pilas



Foto 4. Tracción del Refuerzo



Foto 5. Construcción de la primera hilada de la viga de albañilería. Nótese la junta vertical.



Foto 6. Construcción de la segunda hilada de la viga de albañilería. Nótese los estribos.



Foto 7. Construcción de la tercera hilada de la viga de albañilería. Nótese el refuerzo longitudinal



Foto 8. Vaciado del Grout en la viga de albañilería

Foto 9. Construcción de la base y corona de la viga de albañilería



Foto 10. Construcción de la viga de concreto. Nótese el emparrillado y el vibrado del concreto.



Foto 11. Dispositivos para el ensayo de carga lateral.



Foto 12. Patrón de fallas en la viga de albañilería.



Foto 13. Patrón de fallas en la viga de concreto



Foto 14. Trituración del talón en la viga de concreto.

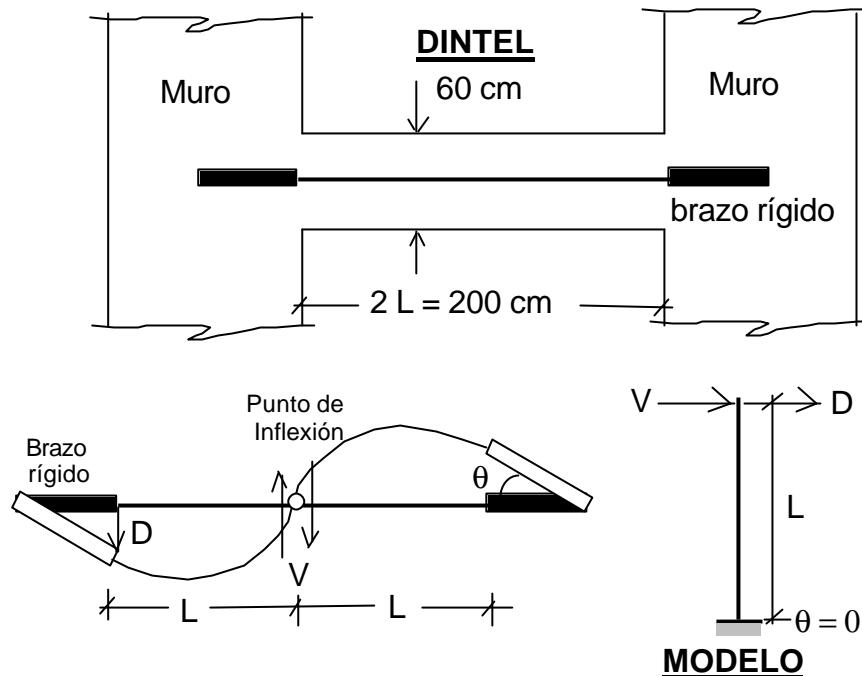


Fig. 1. Prototipo y modelo ensayado.

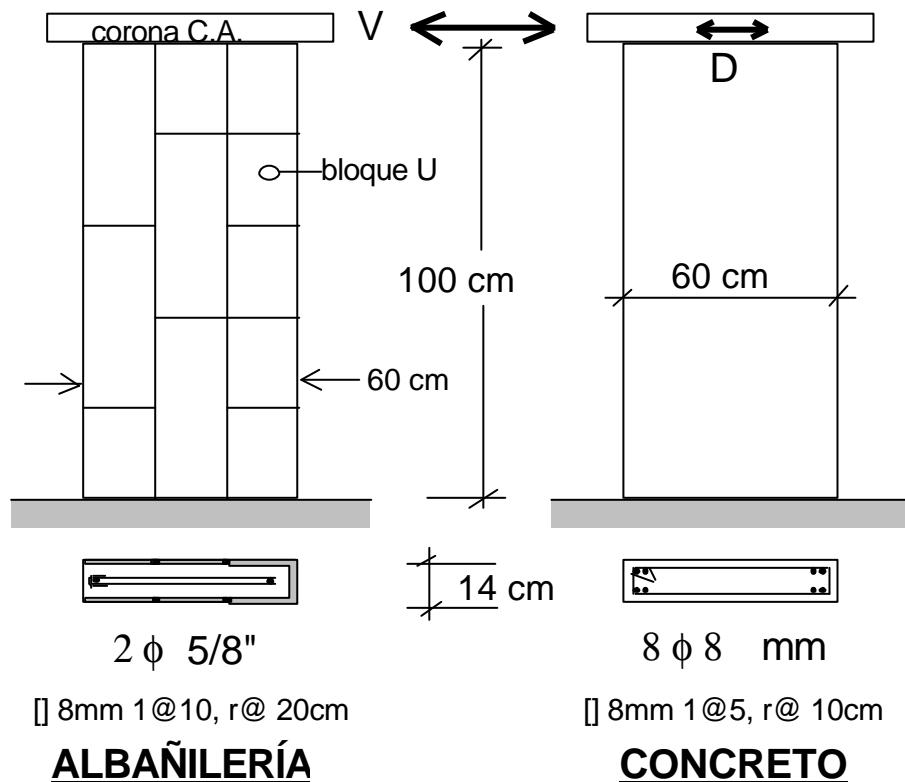


Fig.2. Características geométricas y refuerzo empleado en los especímenes.

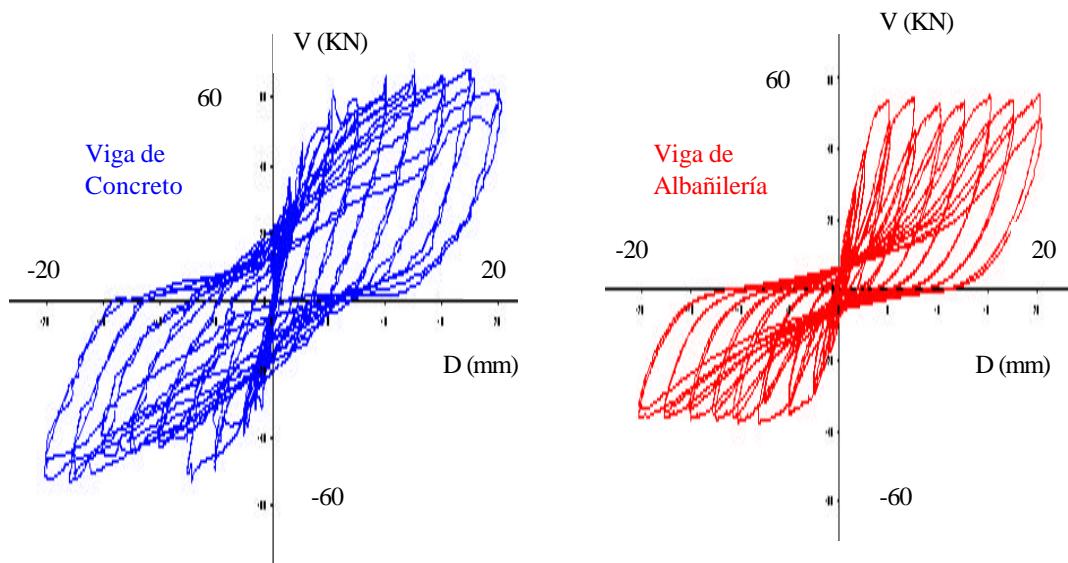


Fig. 3. Lazos histeréticos V-D en el ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento controlado.

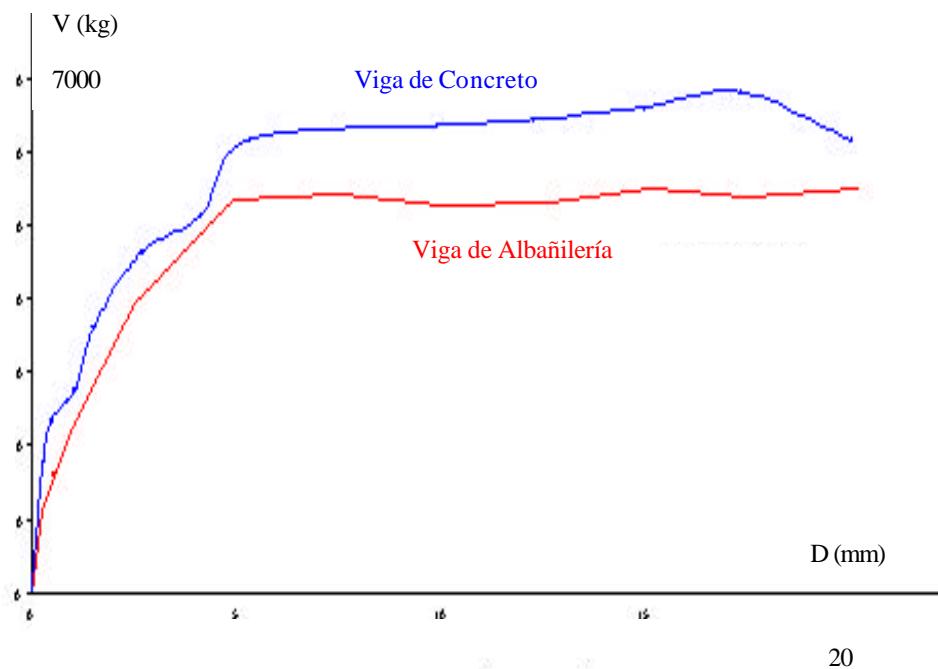


Fig. 4. Envoltoriente de los lazos histeréticos V-D. Rama positiva.