

EFFECTOS DEL PERALTE DEL DINTEL SOBRE EL COMPORTAMIENTO SISMICO
DE UN PORTICO MIXTO DE ALBANILERIA CONFINADA DE DOS PISOS

Por: Enzo Martijena y Angel San Bartolomé

Investigadores de la Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto del peralte del dintel sobre el comportamiento sismico de un pórtico mixto de albañilería confinada de 2 pisos a escala reducida 1/2. El pórtico estuvo compuesto por 2 muros confinados conectados por dinteles, que en un caso fueron vigas chatas y en el otro peraltadas. Adicionalmente, se construyó un muro en voladizo de las mismas características a los muros conectados. Los 3 especímenes fueron ensayados a carga lateral cíclica en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, y los materiales de construcción fueron donados por la compañía Graña-Montero GMI.

INTRODUCCION

Usualmente en nuestro medio, se acostumbra utilizar dinteles peraltados como elementos de conexión entre los muros (Fig.2); esto trae por consecuencia la generación de fuerzas internas en estas vigas que al actuar sobre el muro, contrarrestan los efectos de la carga lateral. Teóricamente puede comprobarse que estas fuerzas de interacción se magnifican conforme se incrementa el peralte del dintel, proporcionando al sistema una serie de ventajas estructurales:

- Disminuye las rotaciones por flexión del muro, atenuándose las concentraciones de esfuerzos en las zonas de conexión muro-dintel-losa.
- Se incrementa la rigidez lateral del sistema, lo que es útil para retardar la falla por corte en los muros; esta falla se produce para pequeñas distorsiones angulares (1/800, Ref.1).
- Se decremente el momento flector en la base del muro, lo que a su vez reduce a: el tamaño de la cimentación, el refuerzo vertical en los muros, los esfuerzos de flexocompresión en los talones del muro; y lo que es más importante, se genera un incremento de la resistencia a fuerza cortante de los muros al disminuir las tracciones por flexión.

Actualmente, con la finalidad de simplificar encofrados y tratar de que los momentos basales se magnifiquen de manera de lograr una falla por flexión en los muros, la bibliografía recomienda el empleo de vigas chatas de conexión.

Dada las dos tendencias expuestas, el objetivo fue investigar el comportamiento sismico del pórtico mixto mostrado en la Fig.1. Adicionalmente, se decidió estudiar un muro en voladizo con el objeto de comparar su comportamiento con los pórticos anteriores; esto se debe a que existen propuestas que desprecian el efecto de interacción de la viga de conexión, tanto en el análisis como en el diseño.

Por otro lado, a fin de eliminar los problemas que usualmente genera la conexión dentada columna-albañilería (cangrejera, rotura de los dientes, etc.), ésta fue a ras; adicionando en esa conexión "mechas" de alambre # 16 cada 3 hiladas. En primer lugar, se levantó la albañilería para luego vaciar las columnas y después la solera (Fig.3).

Debe indicarse que debido a las limitaciones de los equipos del Laboratorio de Estructuras de la PUCP (marco de reacción), el pórtico fue construido a escala reducida (1:2) y ensayado a carga lateral cíclica aplicada en el 2do. nivel, empleando un sólo actuador dinámico.

1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Unidad de Albañilería. La unidad empleada fue de arcilla perforada (caravista de 24x12x6 cm), clasificada como tipo V según las normas ITINTEC, $f'_{\text{b}} = 315 \text{ kg/cm}^2$. Esta unidad fué recortada en 3 partes y asentadas en aparejo de soga (espesor 7 cm), de manera que sus caras de asentado fuesen las originales. La succión natural fue 42 gr/200 $\text{cm}^2\text{-min}$, por lo que las unidades fueron tratadas regándolas un día antes de emplearlas, disminuyendo la succión a 14 gr/200 $\text{cm}^2\text{-min}$.

Mortero. La proporción volumétrica cemento (portland tipo I) : arena tamizada (entre las mallas ASTM #10 y #200), fue 1:4, con resistencia a compresión de 132 kg/cm^2 . La arena gruesa tuvo que ser tamizada debido al pequeño espesor de las juntas (7 mm).

Concreto Fluido. Se usó concreto fluido (slump 8") con resistencia $f'_{\text{c}} = 160 \text{ kg/cm}^2$ y módulo de elasticidad $E_c = 191000 \text{ kg/cm}^2$; su proporción volumétrica Cemento : Arena Tamizada : Confitillo de $\frac{1}{4}$ ", fue 1:2 $\frac{1}{2}$:1 $\frac{1}{2}$. La razón por la que se usó una mezcla fluida fue para facilitar el vaciado en las columnas de pequeña dimensión (10x10 cm).

Acero. Este tuvo un escalón de fluencia y una zona de endurecimiento similar al refuerzo convencional; sus características fueron:

$\phi(\text{mm})$	$f_y (\text{kg/cm}^2)$	$f_{\text{max}} (\text{kg/cm}^2)$	DENOMINACION	USO
2	2150	2865	alambre #16	Mechas
4	2200	3400	alambre #8	Vigas
6	4200	6540	liso	Estríbros
8	4470	6850	corrugado	Columnas

Pilas y Muretes. Se ensayaron a compresión axial y diagonal a 4 pilas y 4 muretes (5 hiladas, a escala reducida) respectivamente; los resultados fueron: Pilas: $f'm = 85 \text{ kg/cm}^2$, $E_a = 42500 \text{ kg/cm}^2$
Muretes: $v'm = 9 \text{ kg/cm}^2$, $G_a = 17000 \text{ kg/cm}^2$

2. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANALISIS Y DISEÑO

El método empleado para el diseño de los especímenes, fue el de rotura contemplando la falla por corte (Ref.1). El procedimiento seguido fue:

A.- Se adoptó como "Sismo Moderado" una carga lateral equivalente al 40% de la carga teórica de agrietamiento diagonal (VR1). El análisis

estructural elástico se realizó con el programa de computación FRAME considerando deformaciones por flexión, corte y axial. El modelaje del muro, se hizo transformando la sección de las columnas de concreto a albañilería. Con la intención de que los dinteles fallen por flexión antes que los muros se agrieten por corte, estos fueron diseñados ante este sismo, utilizando los factores de amplificación de carga y de reducción de resistencia especificados por la Ref.3.

B.- En la determinación de la carga de agrietamiento diagonal (VR), se halló para cada muro dos valores, asociados a los sentidos en los cuales actúa la carga lateral; esto se debe a que una vez plastificadas las vigas de conexión por flexión, crean fuerzas cortantes que se transmiten como cargas axiales de tracción o compresión sobre los muros. Los resultados fueron:

VALORES TEORICOS DE VR (kg) EN UN MURO			
ENTREPISO	VIGA CHATA	VIGA PERALTADA	VOLADIZO
1	2646, 2926	3780, 4267	1912
2	3780, 3920	3780, 4024	3612

Donde: $VR = (0.5 v'm \alpha + 0.23 \sigma) t L$ [1]
 $v'm = 9 \text{ kg/cm}^2$ (resistencia al corte de los muretes)
 $\alpha = \text{reducción de resistencia al corte por esbeltez del muro:}$
 $1/3 \leq \alpha = (Ve L)/Me \leq 1$
 $t = \text{espesor del muro} = 7 \text{ cm}$
 $L = \text{longitud del muro} = 120 \text{ cm}$
 $\sigma = \text{esfuerzo axial actuante en } \text{kg/cm}^2$
 $Me, Ve = \text{momento y cortante del análisis ante sismo moderado.}$

C.- Para el diseño por "Sismo Severo" (cargas asociadas a VR1), se supuso que sólo el primer piso iba a fallar por corte; luego empleando las fórmulas de la Ref.1, se calculó la sección transversal de la columna, su refuerzo vertical y sus estribos. Los resultados del diseño aparecen en la Fig.1. Debe mencionarse que el Muro en Voladizo sólo requería la mitad del refuerzo vertical colocado; sin embargo, a fin de mantener constante el parámetro "Refuerzo Vertical" en los 3 especímenes, se usó en todas las columnas 4 ø 8 mm y el mismo estribaje.

3. ENSAYO Y COMPORTAMIENTO DE LOS ESPECIMENES

El ensayo fue de carga lateral cíclica aplicada en el 2do. nivel (Fig.4), controlando el desplazamiento horizontal del 1er. nivel (d_1) en 6 fases. En cada fase se aplicó un mínimo de 3 ciclos hasta estabilizar el lazo histerético, a una velocidad de 1 ciclo en 4 minutos. Se empleó un total de 15 LVDT que permitieron obtener desplazamientos absolutos y relativos. Las fases fueron:

FASE	1	2	3	4	5	6
d_1 (mm)	±0.25	±1.25	±2.5	±5.0	±7.5	±10.0

El estado final en que quedaron los especímenes, se muestra en las Figs. 6, 8 y 9. Debe indicarse que el orden en que ocurrieron las fallas en las distintas fases del ensayo, fueron:

Fase 1. El comportamiento de los 3 especímenes fue elástico y no se observó la formación de ninguna fisura.

Fase 2. Se formaron (en orden) las siguientes fallas:

- Tracción por flexión en la base de columnas del 1er. piso.
- Tracción por flexión en los extremos de los dos dinteles.
- Tracción diagonal en el 1er. piso. Caso "Viga Peralta".

Fase 3. Se formaron las siguientes fallas:

- Tracción diagonal en el 1er. piso. Caso "Viga Chata".
- Tracción diagonal en el 1er. piso. Caso "Voladizo". Ver la Fig.5.
- Tracción por flexión en las bases de las columnas del 2do. piso.
- Tracción diagonal en el 2do. piso. Caso "Viga Peralta".
- Fisura en la conexión columna-albañilería, 1er piso. Caso "Voladizo"

Fase 4. Se registraron las siguientes fallas:

- Caso "Viga Peralta": Tracción en la parte intermedia de la solera del 1er. nivel del muro B (propagación de la falla diagonal del 2do. piso); y fisura en la zona de conexión columna-muro.

Para el caso "Voladizo", la secuencia fue:

- Tracción diagonal del 2do. piso.
- Falla local por anclaje de la solera del 1er. nivel. Ver la Fig.7.
- Separación total de la conexión columna-muro. FIN del ensayo.

Fase 5. Esta fase supera al límite de reparabilidad indicada por la Ref.1 ($h/200 = 6$ mm). Se registraron las siguientes fallas:

- Caso "Viga Peralta": ampliación de la falla local registrada en la Fase 4 (tracción de la solera del muro B, Fig.8). FIN del ensayo.

Para el caso "Viga Chata", la secuencia fue:

- Falla en la zona de conexión columna-muro del 2do. piso, Muro A.
- Tracción diagonal del 2do. piso; 1ro. Muro A, luego el Muro B.

Fase 6. El único espécimen que soportó esta fase, fue el caso "Viga Chata"; en esta fase se produjo una pequeña fisura de tracción en la parte intermedia de la solera del 1er. nivel del muro B.

4. COMENTARIOS SOBRE LAS FORMAS DE FALLA

En este acápito se trata de explicar el comportamiento inelástico de los especímenes, indicándose la causas de las fallas.

4.1. Falla por Corte del Segundo Entrepiso

Pese a que teóricamente sólo se esperaba la falla por corte de los muros del 1er. piso (excepto en el caso Viga Peralta), en el ensayo de los 3 especímenes se produjo la rotura diagonal de los muros del

2do. piso; esto podría deberse a:

A.- Durante el ensayo se controló el desplazamiento del 1er. nivel, por lo cual hubo que aplicar desplazamientos excesivos sobre el 2do. nivel, creando distorsiones angulares en el 2do. entrepiso que llegaron a sobrepasar a las del 1ro. (por encima del valor de rotura 1/800, ver Figs. 13 y 14).

B.- Se observó que el tipo de ensayo con carga única aplicada en el 2do. nivel, propicia la falla por corte en el 2do. piso del muro A (falló antes que el B), pues al empujar la viga de conexión del 1er. nivel funciona como un puntal, contrario al sentido de aplicación de la carga, lo que crea una distorsión angular en ese piso que no debería producirse en un sistema real, ya que en este último existe carga sobre el 1er. nivel. Es más, en la Ref.5 pudo observarse mediante una prueba dinámica de un espécimen de 3 pisos, que luego de producirse el agrietamiento por corte del 1er. piso, las fuerzas de inercia se concentraban en mayor proporción sobre el 1er. nivel.

C.- Para los casos Voladizo y Viga Peraltada, después del agrietamiento diagonal del 1er. piso y antes de la falla del 2do. piso, la rigidez lateral inicial del 1ro. (K_{10}) degradó a un valor K_1 ; sin embargo, esta rigidez degradada continuó siendo mayor a la del 2do. piso (K_2). Puesto que la fuerza cortante era única en ambos entrepisos (caso irreal), el 2do. piso se deformó más que el 1ro., agrietándose por distorsión angular:

CASO	K_{10} (FRAME)	VALORES DE LA RIGIDEZ LATERAL EN CADA MURO "K" (kg/cm)		
		TEORICO	EXPERIMENTAL	
Viga Chata	61675	51420	19723	31971
Viga Peraltada	75086	67298	25242	15250
Muro en Voladizo	49593	24215	10986	6731

D.- Para el caso Voladizo, posterior al agrietamiento diagonal del 1er. piso, la carga continuó incrementándose desde un valor $VR = 2250$ kg, hasta un valor de 3700 kg (ver Fig. 10), que superó a la resistencia teórica del 2do. piso ($VR_2 = 3612$ kg). Esta sobre-resistencia, se debe a que el refuerzo vertical utilizado en las columnas fue el doble del requerido por la propuesta de diseño a la rotura (Ref.1).

4.2. Falla en la Solera del 1er. Nivel del Muro B. Muros Conectados

En las Figs. 8 y 9, puede observarse como la fisura de tracción diagonal que se produjo en el 2do. piso del muro B, se propaga por la zona intermedia de la solera del 1er. nivel, en mucha mayor proporción para el caso Viga Peraltada que para el caso Viga Chata. Esto se debe a un error en el diseño, al omitirse el refuerzo horizontal mínimo que debe llevar la solera, y que de acuerdo a las Refs.1 y 4 es:

$$As \geq 0.1 f'c Ac/fy = 0.1 \times 160 \times (8 \times 30) / 2200 = 1.74 \text{ cm}^2$$

Este refuerzo es más del doble del que se usó ($As = 0.75 \text{ cm}^2$) y por lo tanto motivó que en el caso Viga Peraltada (donde la carga fue mayor

al caso Viga Chata) esta grieta (incontrolada por el escaso refuerzo empleado que terminó fracturado), fuese determinante para producir la falla final de este espécimen.

4.3. Falla por Anclaje del Refuerzo de la Solera del 1er. Nivel del Muro en Voladizo (Figs. 6 y 7)

En el caso "Voladizo", el refuerzo horizontal de la solera del 1er. nivel penetró sólo hasta el eje de la columna (5 cm); esto dió lugar a que luego de haberse formado la grieta diagonal en el 2do. piso, se formase una cuña triangular por donde se transmitía la mayor parte de la carga lateral, cuya componente horizontal no pudo ser tomada por el refuerzo de la solera ya que su anclaje era inadecuado; esto motivó la falla final de este espécimen.

Según la Ref.3, la longitud de desarrollo para la parte recta de un gancho a 90°, debe evaluarse con la expresión: $Ldg = 318 \text{ db}/\sqrt{f'c}$; con la cual para el alambre #8 (db = 4 mm) y para $f'c = 160 \text{ kg/cm}^2$, se obtiene $Ldg = 10 \text{ cm}$, al que añadiendo los recubrimientos sobrepasa el peralte de la columna. Este error ocurrió debido a la escala reducida de los especímenes que llevó a respetar el peralte de la columna mas no a la longitud de anclaje que es independiente de la escala. Una solución para futuros especímenes a escala, respetando la geometría de la columna, es la de crear un anclaje mecánico.

4.4. Falla en la Junta a Ras Columna-Albañilería

La falla en la zona de conexión columna-albañilería, se inició en las fases 3, 4 y 5 (posteriores a la falla por corte) para los casos "Voladizo", "Viga Peralta" y "Viga Chata", respectivamente. Esta falla fue muy seria para el caso "Voladizo" (Fig.7), pero esto se debe principalmente a la repercusión de la falla mencionada en 4.3, que no pudo ser soportada por las pocas "mechas" de anclaje.

De acuerdo a la Ref.1, se tiene que al no existir carga vertical sobre los muros, no era necesario colocar refuerzo horizontal mínimo (0.1%) anclado sobre las columnas; sin embargo, la presencia de este refuerzo hubiese permitido:

A.- Atenuar la falla de tracción en la solera del caso Viga Peralta (ver 4.2), al controlar la propagación de esta falla sobre la albañilería del muro B en el 1er. entrepiso.

B.- En el caso Voladizo, habría ayudado a evitar el desprendimiento de la columna derecha, producto de la falla por anclaje del refuerzo de la solera (ver 4.3).

5. CONCLUSIONES

Debe indicarse que las conclusiones obtenidas en este proyecto, son limitadas en vista de que el comportamiento de los especímenes estuvo fuertemente influenciada por la técnica de ensayo utilizada y por los errores cometidos en el diseño; sin embargo, estos defectos ayudaron a detectar problemas que podrían presentarse en casos reales.

1.- Análisis Elástico. El modelaje por barras (con el criterio de la sección transformada) y el uso de programas de cómputo que contemplan deformaciones por flexión, corte y axial, proporcionaron valores de la rigidez lateral cercanos a los experimentales. Por otro lado, pudo observarse el cumplimiento de la hipótesis de Navier (sección plana); por lo cual, pueden modelarse las vigas contemplando una zona flexible en la parte del vano y brazos rígidos en la parte de los muros

2.- Predicción de la Fisura de Tracción por Flexión en las Columnas. Mediante la teoría de flexión, aplicada sobre la sección transformada, del muro, e igualando el esfuerzo máximo de tracción a la resistencia a tracción por flexión del concreto ($2f'_c$), se obtuvo un momento basal $M_{cr} = 330,716 \text{ kg-cm}$. Luego efectuando proporciones con los momentos basales obtenidos del análisis elástico (M), pudo predecirse en los 3 pórticos la carga lateral (V) asociada a la formación de la primera fisura por flexión en la base de las columnas (Fase 2), con un rango de error de 7 %.

CASO	M (V=1000 kg)	V (teórico)	V (experimental)
	(kg-cm)	(kg)	(kg)
Viga Chata	90342	3661	4331 ... 2 muros
Viga Peraltada	63596	5200	5241 ... 2 muros
Muro en Voladizo	252000	1312	1254 ... 1 muro

3.- Fisuración de Tracción por Flexión en los Extremos de las Vigas de Conexión. La carga lateral, asociada a esta falla no pudo predecirse debido a que las vigas estuvieron sujetas a cargas axiales de compresión indeterminadas; esto produjo valores experimentales por encima de los teóricos. En el caso de la viga del 2do. nivel, hubo que aplicarle una precompresión, ajustando los tirantes horizontales conectados al actuador dinámico, para de este modo poder efectuar el ensayo cíclico.

4.- Predicción de la Carga de Agrietamiento Diagonal (VR) en el 1er. Piso. Suponiendo que cada muro absorbe la mitad de la carga total y aplicando la Fórmula 1 (ver 2.B), se concluye que el valor VR en el 1er. piso de cada muro, puede predecirse con un error de 12%.

CASO	VR Teó.(kg)	VR Exp.(kg)	δ (mm)	DISTORSION
Viga Chata	2646	2865	1.42	1/845
Viga Peraltada	3780	3383	1.34	1/900
Muro en Voladizo	1912	2250	1.40	1/850

5.- Efectos del Peralte de la Viga de Conexión. En la Fig.13, puede observarse que la rigidez lateral elástica, así como la resistencia a fuerza cortante, se incrementan en el orden siguiente: "Voladizo", "Viga Chata" y "Viga Peraltada". Esto se debe, a que cuanto mayor es el peralte de la viga se producen en ella mayores momentos y cortantes, que contrarrestan los efectos de la carga lateral aplicada; por lo tanto, aunque los muros estén conectados por vigas chatas estos no deben ser modelados como sistemas en voladizo. Sobre la capacidad máxima de deformación (ductilidad), no pudo llegarse a ninguna conclusión debido a las fallas locales que tuvieron los casos Voladizo y Viga Peraltada (ver la siguiente conclusión).

6.- Errores en el Diseño. Para los casos Voladizo y Viga Peraltada,

ocurrieron fallas locales que determinaron la culminación del ensayo:

a) En la Fase 4 del caso "Voladizo", se produjo el agrietamiento diagonal del 2do. piso; esto se debió a que se empleó un refuerzo vertical que era el doble del requerido, con lo cual la carga máxima superó al valor VR2. Posteriormente, ocurrió una falla por anclaje del refuerzo colocado en la solera del 1er. nivel. De esta manera se concluye que un exceso de refuerzo vertical puede ser contraproducente, y que a la columna debe proporcionársele un peralte tal que permita anclar al refuerzo de la solera.

b) En la Fase 5 del caso Viga Peraltada, se observó una falla por tracción de la viga solera del Muro B, debido al escaso refuerzo colocado (por debajo del mínimo recomendado en las Refs. 1 y 4).

7.- Técnica de Ensayo. La carga lateral aplicada en el 2do. nivel del pórtico, generó fuerzas axiales de compresión desconocidas sobre las vigas, lo que produjo al empujar:

- Una recarga sobre el muro B y descarga sobre el muro A, manifestada en que el muro B falló antes que el A y tuvo mayor deterioro.
- La falla por corte del 2do. piso del muro A (falló antes que el B), por la acción de puntal de la viga del 1er. nivel (contraria a la carga aplicada) y la no existencia de carga en el 1er. nivel.

Otro defecto observado fue que el control de desplazamientos en el 1er. nivel, hizo que se aplicase sobre el 2do. piso desplazamientos elevados, por encima de su nivel de agrietamiento diagonal (1/800).

8.- Comportamiento General de los Especímenes. En los 3 especímenes, la secuencia en que las fallas ocurrieron fue: 1) Fisura de tracción por flexión en las bases de las columnas, 2) Fisura de tracción por flexión en los extremos de las vigas de conexión, 3) Falla por corte del 1er. piso, 4) Falla por corte del 2do. piso, y 5) Fallas locales para los casos Voladizo y Viga Peraltada. Debe mencionarse que el orden en que aparecieron estas fallas fue predecible o explicable y que su secuencia es recomendable, en vista que existe disipación de energía por flexión previa a la falla por corte de los muros.

REFERENCIAS

1. A. San Bartolomé R. "Albañilería Confinada". Libro 4. Colección del Ingeniero Civil. CIP. Lima, 1991.
2. OIN. "Normas de Diseño Sismo-resistente". Lima 1977.
3. Norma Peruana de Concreto Armado. NTE E-060, 1989.
4. Norma Peruana de Albañilería. NTE E-070, 1982.
5. A. San Bartolomé y D. Quiun. "Comportamiento Sísmico de un Módulo a Escala Reducida de Albañilería Confinada de 3 Pisos". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Piura

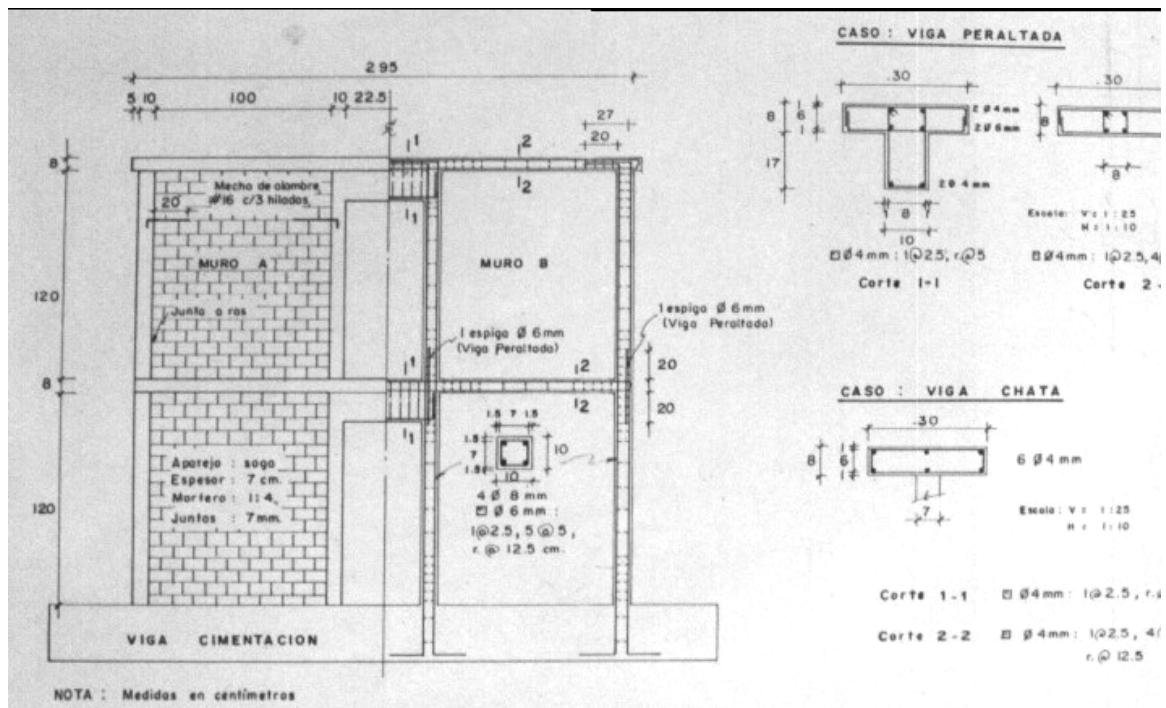


Fig.1. Geometría y refuerzo de los especímenes.



Fig.2. Prototipo.

Fig.3
Construcción del
espécimen con
“Viga Peraltada”.



Fig.4

Vista global de los dispositivos.

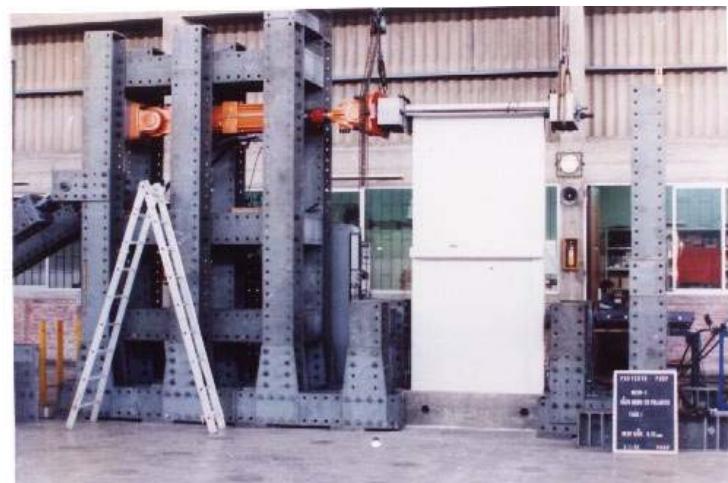


Fig.5

Caso
“Voladizo” –
Fase 3. Rotura
diagonal del
primer piso.



Fig.6. Caso “Voladizo” – Fase 4. Fin del ensayo.

Fig.7. Detalle de la falla por anclaje del refuerzo de la solera. Caso “Voladizo”.



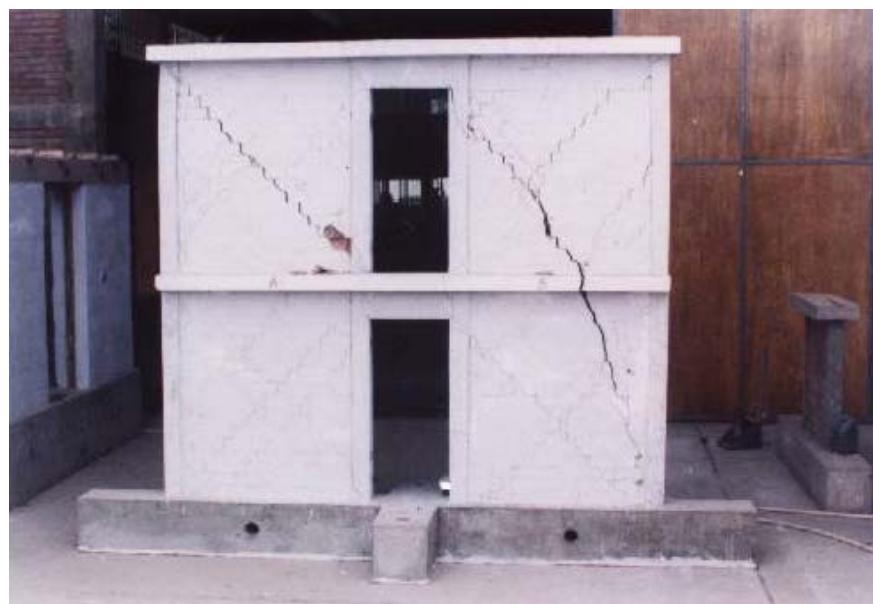


Fig.8. Caso “Viga Peraltada” – Fase 5. Obsérvese la Falla por tracción en la solera del muro B.



Fig.9. Caso “Viga Chata” – Fase 6.

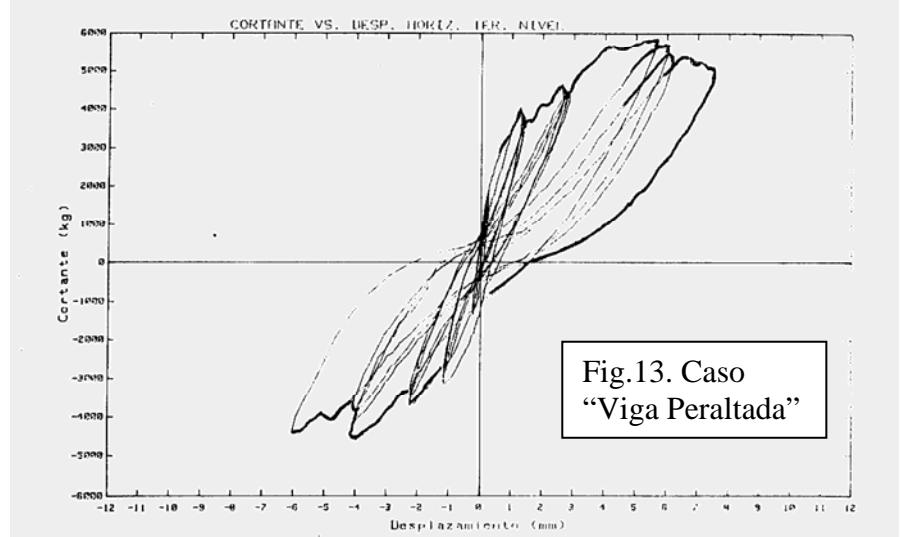
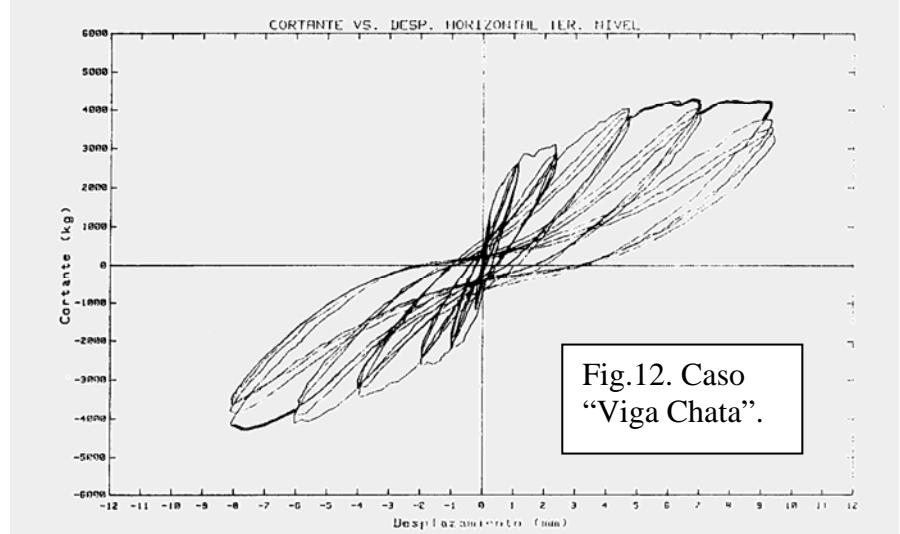
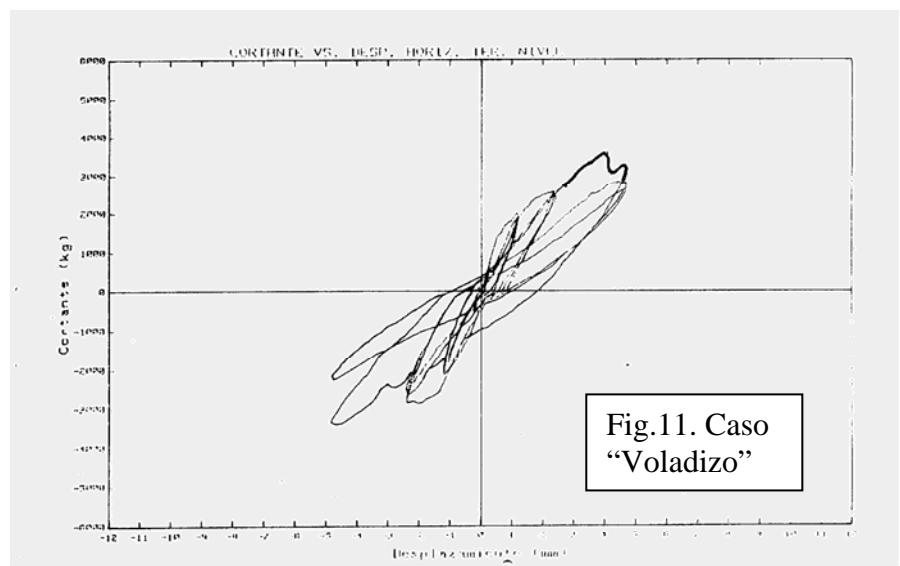
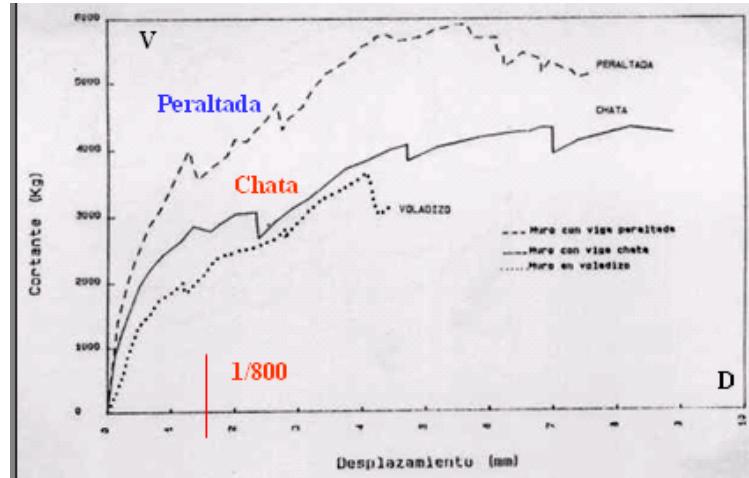


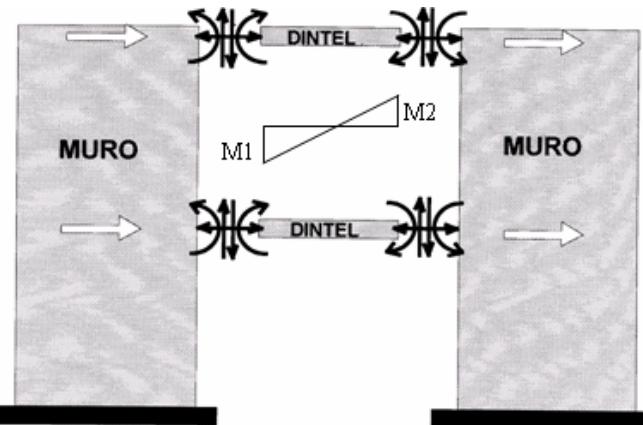
Fig.14

Envolvente V-D
del Primer Piso.



FIGURAS ADICIONALES AL ARTÍCULO

Las fuerzas internas en la viga dintel, se transmiten en sentido contrario sobre los muros, contrarrestando los efectos de la carga lateral y rigidizando a los muros.



El punzonamiento que ejerce el muro sobre la losa de techo disminuye cuando se incrementa el peralte de la viga dintel.