

EFFECTOS DE LA ESBELTEZ SOBRE LA RESISTENCIA A FUERZA CORTANTE DE LOS MUROS DE ALBAÑILERIA CONFINADA. ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS.

**Por Ings.: Antonio Zeballos, Angel San Bartolomé y Alejandro Muñoz
Pontificia Universidad Católica del Perú**

RESUMEN

Este trabajo tiene por finalidad estudiar teóricamente, mediante el método de Elementos Finitos, la influencia de la esbeltez (relación altura-longitud) de los muros de albañilería confinada sobre su resistencia al esfuerzo cortante, hecho que se ha podido apreciar en los ensayos de laboratorio realizados en la Universidad Católica. El objetivo es tratar de encontrar una expresión que permita corregir la resistencia al corte de los muros de forma cuadrada, para lo cual se analizaron 15 muros confinados variando su esbeltez.

1. INTRODUCCION

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, muestran que la resistencia al esfuerzo cortante de los muros de albañilería confinada disminuye notablemente a medida que éstos se hagan más esbeltos (Refs. 1 y 2), sin embargo, este efecto no se encuentra reflejado en las fórmulas del Reglamento Peruano (Norma E-070), mientras que en algunos países, como Estados Unidos, México y Japón, presentan este efecto en sus códigos respectivos.

Por otro lado, los experimentos generalmente se han realizado sobre muros de forma cuadrada, por lo que el objetivo del presente trabajo es tratar de encontrar teóricamente un factor de corrección que multiplicado por la resistencia al corte de los muros cuadrados, permita contemplar el efecto de la esbeltez.

Con respecto a los métodos teóricos de análisis, el método de Elementos Finitos es una herramienta muy confiable y es utilizada en el análisis de sistemas continuos, pero una complicación que se presenta en el estudio de la albañilería es su anisotropía, producto de la existencia de juntas horizontales y verticales de mortero. Esta característica hace que las fórmulas desarrolladas sean aproximadas, ya que los modelos se han supuesto como si la albañilería fuese un material elástico, homogéneo e isotrópico.

2. LINEAMIENTOS GENERALES

Se trata de estudiar la influencia de la esbeltez (expresada por la relación altura-longitud del muro: H / L , o por la relación Momento flector / Cortante-Longitud: $M / V L$) sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los muros de albañilería confinada, para lo cual, primeramente se hará un análisis teórico por el método de resistencia de materiales, luego, empleando el programa SAP90, se efectuará el análisis por el método de Elementos Finitos, finalmente, los resultados se ordenarán y analizarán tratando de encontrar una fórmula que relacione la esbeltez del muro con la resistencia al esfuerzo cortante

3. ANTECEDENTES

NORMA E-070. En el Reglamento peruano se proporciona el esfuerzo admisible por fuerza cortante, tanto para la albañilería confinada como para la armada. Esta resistencia depende del efecto de la carga vertical y de la inclusión de cal en el mortero; pero, no se contempla el efecto de la esbeltez de los muros y se aplica indistintamente ya sea el muro de uno o de cinco pisos.

MASONRY STRUCTURES BUILDING CODE ACI 530-88/ASCE 5-88. Al igual que el Reglamento peruano, en el Reglamento americano se proporcionan valores para los esfuerzos admisibles en la albañilería, pero, el efecto de la esbeltez se mide a través de la relación M/VL .

NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERIA. México DF. 1987. Este código indica que la contribución de los muros esbeltos a la resistencia al corte del entrepiso debe ser multiplicada por el siguiente factor de reducción:

$$(1.33L/H)^2 \leq 1$$

Donde "L" y "H" son la longitud y altura del muro, respectivamente.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE ALBAÑILERÍA - REGLAMENTO JAPONÉS. En el Reglamento japonés se proporciona una fórmula bastante compleja, que permite calcular la resistencia al corte, notándose que la esbeltez se toma en cuenta mediante el factor M/VL , el cual disminuye la resistencia al corte del muro.

EFFECTOS DE LA ESBELTEZ EN MUROS CONFINADOS A ESCALA 1:2 (Ref 1). En este trabajo se hicieron ensayos a escala 1:2 de ocho muros de albañilería confinada variando la relación H/L desde 0.5 hasta 2.5. Se realizaron dos series de ensayos, una con carga monotónica (serie 1) y otro con carga ciclica (serie 2). Para cada relación H/L , los principales resultados fueron:

MURO	L x H (m)	H / L	v_R (kg/cm ²)
A1	2.00 x 1.00	0.50	5.87
B1	1.00 x 1.00	1.00	5.47
C1	1.00 x 1.75	1.75	3.00
D1	1.00 x 2.50	2.50	2.64
A2	2.00 x 1.00	0.50	5.26
B2	1.00 x 1.00	1.00	6.41
C2	1.00 x 1.75	1.75	4.13
D2	1.00 x 2.50	2.50	2.54

v_R = esfuerzo cortante asociado al agrietamiento diagonal

En este caso el momento flector en la base es: $M = V * H$, por lo que la relación de esbeltez $M / (V * L)$ se convierte en H / L . De los resultados mostrados en la tabla se concluye que la resistencia al corte permanece prácticamente constante cuando $H / L < 1$, mientras que cuando $H / L > 1$, la resistencia al corte disminuye en proporción a la inversa de la esbeltez H / L .

CONSTRUCCIONES DE ALBAÑILERIA. COMPORTAMIENTO SISMICO, y DISEÑO ESTRUCTURAL (Ref.3). El efecto de la esbeltez de los muros, que disminuye la resistencia al corte, se contempla en la siguiente fórmula a través del factor "α":

$$R = 0.5 v'_m \alpha A + 0.23P$$

$$1/3 \leq \alpha = \frac{VL}{M} \leq$$

donde:

VR = fuerza cortante asociado al agrietamiento diagonal de la albañilería confinada

v'_m = resistencia característica a compresión diagonal de muretes pequeños

P = carga axial

A = área de corte del muro

Este factor "α" es el que se pretende comprobar teóricamente en este trabajo.

4. ESTUDIO DEL PROBLEMA POR RESISTENCIA DE MATERIALES.

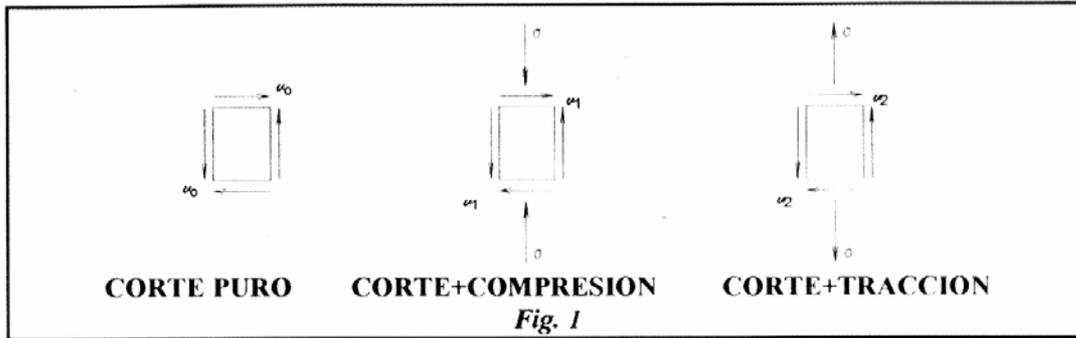
Para poder plantear el problema por el método de resistencia de materiales se supondrá que un elemento del muro está sometido a un estado plano de esfuerzos (Fig.1). La falla por corte de la albañilería es en realidad por tracción diagonal, la que se produce al someter al elemento a esfuerzos cortantes combinados con esfuerzos normales. Admitiéndose que el elemento falla al alcanzar un determinado valor del esfuerzo de tracción diagonal " σ_p " (Fig.2), se tendrá:

En un primer estado de esfuerzos, en el que sólo se están aplicando esfuerzos de corte, utilizando la teoría de Mohr para hallar los esfuerzos principales de tracción, se obtiene:

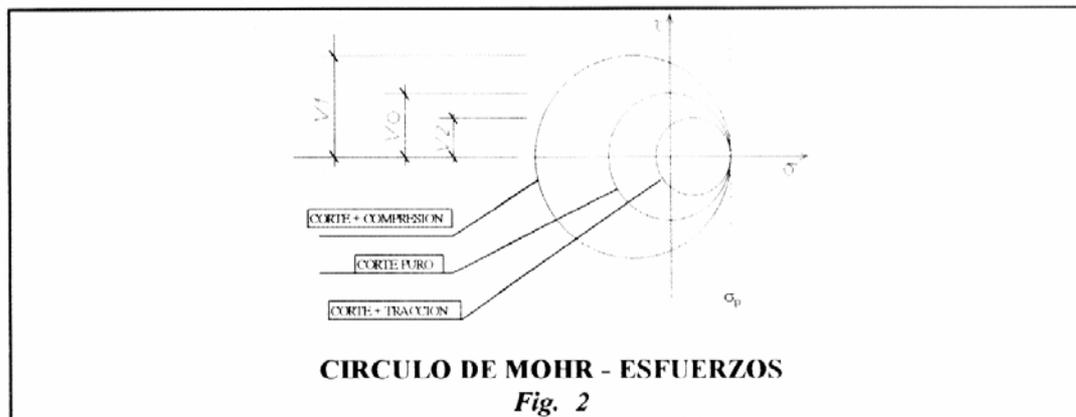
$$\sigma_p = v_o$$

En un segundo estado de esfuerzos se somete al elemento a esfuerzos combinados de corte y compresión, obteniéndose: $v_1 = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_p \times \sigma_c} > v_o$

En un tercer estado de esfuerzos tenemos al elemento sometido a esfuerzos combinados de corte y tracción lo que proporciona: $v_2 = \sqrt{\sigma_p^2 - \sigma_p * \sigma_t} < v_o$



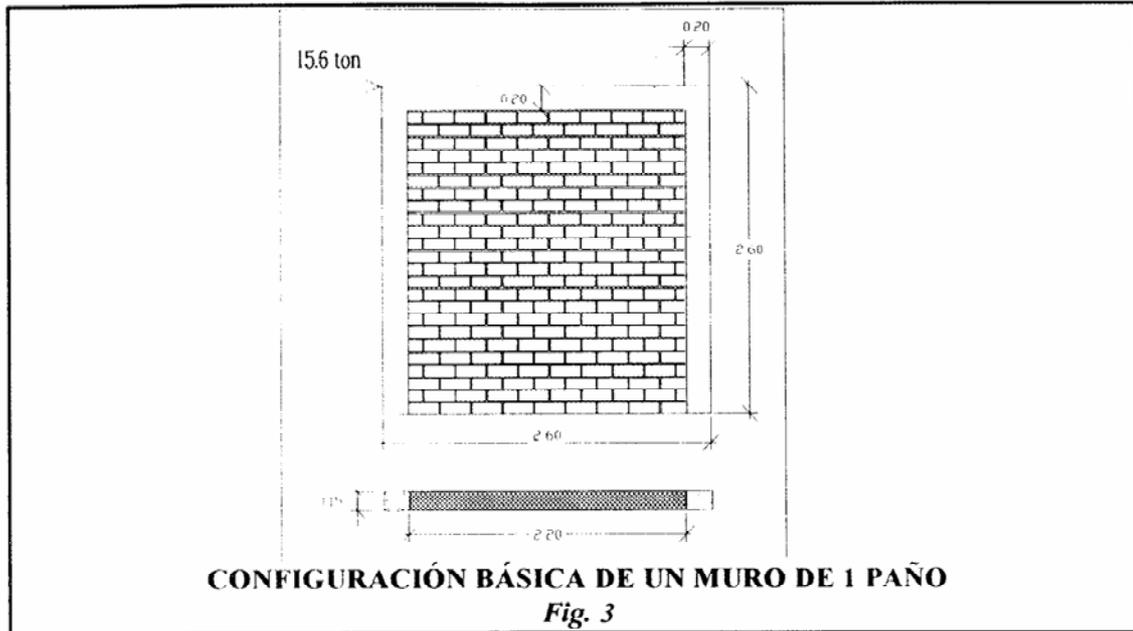
Los gráficos que se obtienen de aplicar la teoría de Mohr en los tres estados mostrados en la Fig.1, para producir el esfuerzo principal de tracción (σ_p), se muestran en la Fig.2.



Bajo la hipótesis descrita, se concluye que los esfuerzos normales de tracción aceleran la formación de la falla por tracción diagonal.

5. MURO PATRON

Se ha tomado como muro patrón a un muro cuadrado de 2.6 x 2.6 m y 0.15 m de espesor, con dos columnas de confinamiento de concreto armado de 0.15 x 0.20 m y una viga solera de 0.15 x 0.20 m también de concreto armado (Fig.3). Todos los resultados que se obtengan de los demás muros se compararán con los resultados del muro patrón, que además es la base del modelaje de los muros restantes. Este muro se encuentra sometido a una carga lateral de 15.6 ton, que corresponde a la carga experimental que produce su falla por agrietamiento diagonal.



Puesto que la fuerza cortante máxima se produce en el primer piso de una edificación, fue en el primer piso donde se utilizó una malla con elementos pequeños de 20x20 cm, mientras que en los pisos superiores se emplearon elementos de mayor dimensión, para ahorrar memoria del computador. En los pisos superiores el marco de confinamiento se modeló mediante elementos de 20x20 cm (con 9 nudos), mientras que en la albañilería se utilizaron elementos de 40x40 cm (con 9 nudos), con elementos intermedios de transición. Para la transición se utilizaron elementos de 20x20 cm definidos por 5 nudos seguidos por elementos de 20x40 cm definidos por 6 nudos. La idea de esta transición es que todos los nudos que definen un elemento sirvan también para definir los elementos vecinos.

Las propiedades de los elementos, como son el concreto del marco de confinamiento y la albañilería de unidades de arcilla sólida, fueron tomados de la Ref.3. Estos valores son los siguientes:

- $E_c = 2'000,000 \text{ ton/m}^2$ (módulo de elasticidad del concreto)
- $G_c = 833,333 \text{ ton/m}^2$ (modulo de corte del concreto)
- $E_a = 320,000 \text{ ton/m}^2$ (modulo de elasticidad de la albañilería)
- $G_a = 128,000 \text{ ton/m}^2$ (modulo de corte de la albañilería)

6. ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LOS MUROS CONFINADOS

En este trabajo se analizaron 15 muros de diversas dimensiones, desde el muro cuadrado de 1 paño y 1 piso (muro patrón) hasta un muro de 3 paños y 5 pisos (Fig.4). Adicionalmente, se forzó a que el desplazamiento horizontal de los nudos que definen la viga solera sean iguales entre sí, de esta manera, se incluye en el análisis el efecto de diafragma rígido que tiene la losa del techo. Los 15 muros fueron sometidos a un sistema de cargas estáticas (Fi) aplicadas en el nivel de cada losa, con distribución triangular, tal como

especifica el Reglamento de Diseño Sismo-resistente, teniendo siempre un cortante basal de 15.6 ton.

$$F_i = 15.6 \frac{h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad \text{donde } h_i \text{ es la altura al } i\text{-ésimo nivel.}$$

7. ANALISIS DE RESULTADOS

El procesamiento de resultados se llevó a cabo contemplando dos criterios para definir el instante en que ocurría el agrietamiento diagonal del muro en el primer piso; estos fueron: 1) suponer que todos los muros fallan cuando se alcanza el mismo nivel de esfuerzo principal de tracción; y, 2) suponer que todos los muros fallan cuando se alcanza la misma distorsión angular 1/800 (valor experimental proveniente de la Ref.3).

7.1 Criterio del Esfuerzo Principal Máximo de Tracción

Puesto que todos los muros fueron procesados para la misma magnitud de fuerza cortante basal (15.6 ton), para hacer una comparación entre los resultados de los muros de 1 paño con los de 2 y 3 paños, es necesario normalizar al mismo valor el esfuerzo cortante promedio de la sección. Para esto, considerando que el programa hace un análisis elástico, se ha multiplicado los valores de los esfuerzos principales de tracción máxima obtenidos en la región central del primer piso por la relación que guardan las longitudes L / L_0 (donde L_0 es la longitud del muro patrón: 2.6m), en vista que el espesor "t" era único en todos los muros.

En el Gráfico 1 aparecen los valores del esfuerzo principal de tracción máximo, y su correspondiente valor $V L / M$; donde $M = V h_r$, siendo "h_r" la altura donde está aplicada la carga resultante (V). Este gráfico proviene de la Tabla 1, donde la nomenclatura empleada es la siguiente:

MURO: número de paños x número de pisos

σ_p = esfuerzo máximo de tracción principal (en ton/m²) en la zona intermedia del primer piso, normalizando al mismo valor el esfuerzo cortante promedio.

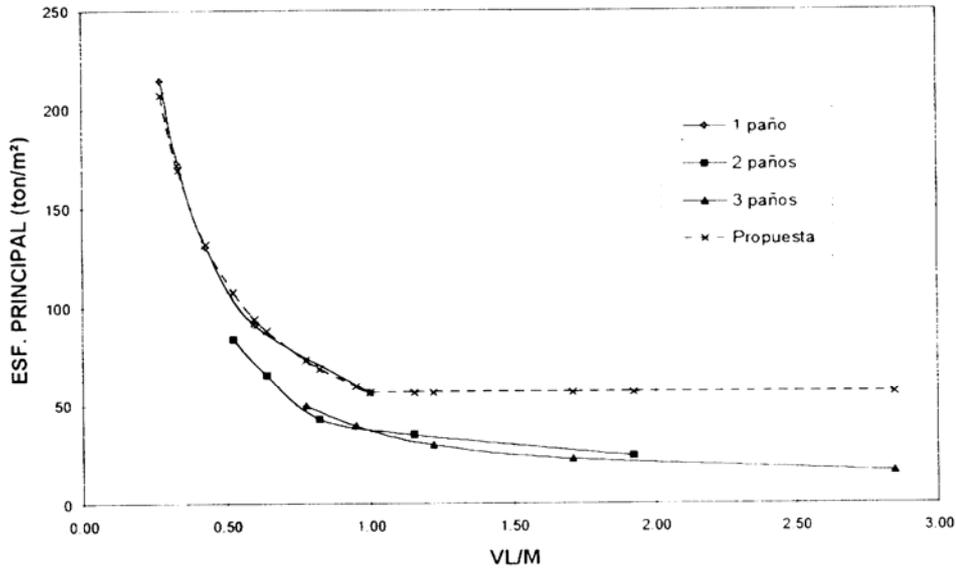
Adicionalmente, en la Tabla 1 se ha agregado una propuesta para predecir el valor σ_p consistente en multiplicar a σ_{p0} (valor σ_p correspondiente al muro cuadrado o muro patrón) por $M / V L$, de tal modo que el valor resultante no sea inferior a σ_{p0} :

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \times \left(\frac{M}{V \times L} \right) \leq \sigma_{p0}$$

TABLA 1 ESFUERZOS PRINCIPALES DE TRACCION MAXIMA NORMALIZADOS AL MISMO VALOR DEL ESFUERZO CORTANTE PROMEDIO.

MURO	1x1	1x2	1x3	1x4	1x5	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	3x1	3x2	3x3	3x4	3x5
VL/M	1.00	0.60	0.43	0.33	0.27	1.92	1.15	0.82	0.64	0.52	2.85	1.71	1.22	0.95	0.78
σ_p	56.46	91.15	130.37	171.98	214.44	24.17	34.90	42.67	65.19	83.72	16.46	22.65	29.70	39.46	49.67
PROPUESTA	56.46	94.10	131.75	169.39	207.03	56.46	56.46	68.51	88.08	107.65	56.46	56.46	56.46	59.51	72.74

GRAFICO N°1: ESFUERZO PRINCIPAL vs VL/M



De los resultados que se muestran en el Gráfico 1 se observa que el valor del esfuerzo principal de tracción (σ_p), es mayor cuando la relación $M / V L$ aumenta, lo que implica que a mayor esbeltez se acelera la formación de la grieta diagonal. Adicionalmente, se nota que la parte de la curva que corresponde a muros con esbeltez $M / V L \geq 1$ se asemeja bastante bien a la ecuación propuesta.

7.2 Criterio de la Distorsión Angular

En el Gráfico 2, se muestra la relación que existe entre la fuerza necesaria para lograr un desplazamiento $h / 800$ en el primer nivel y la relación $V L / M$. Para obtener este gráfico, al igual que en el caso anterior, se han multiplicado los resultados (en este caso desplazamientos) por un factor de proporcionalidad de manera de obtener en el primer nivel de todos los muros desplazamientos iguales a: $h / 800$. Este factor multiplica también al esfuerzo cortante promedio obtenido con una fuerza de 15.6 Ton.

En este gráfico también se aprecia que cuando $M / V L \geq 1$ el esfuerzo cortante de rotura (τ) decrece, mientras que cuando $M / V L < 1$ este esfuerzo trata de estabilizarse y conservadoramente puede adoptarse para los muros con poca esbeltez al esfuerzo de rotura correspondiente al muro cuadrado.

FUERZA APLICADA NECESARIA PARA LOGRAR DEFORMACION ANGULAR 1/800 EN PRIMER NIVEL : V800															
muro	1x1	1x2	1x3	1x4	1x5	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	3x1	3x2	3x3	3x4	3x5
D(mm)	1.19	1.59	2.01	2.42	2.83	0.47	0.55	0.66	0.72	0.83	0.29	0.34	0.38	0.42	0.47
D800(mm)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
V(Ton)	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60	15.60
D800/D	2.74	2.04	1.62	1.34	1.15	6.90	5.92	4.89	4.53	3.90	11.16	9.69	8.60	7.71	6.97
V/L/M	1.00	0.60	0.43	0.33	0.27	1.92	1.15	0.82	0.64	0.52	2.85	1.71	1.22	0.95	0.78
V800(Ton)	42.73	31.83	25.27	20.96	17.90	107.70	92.36	76.25	70.94	60.81	174.02	151.21	134.19	120.34	109.67
r (Ton/m ²)	109.56	81.62	64.81	53.74	45.91	143.60	123.15	101.67	94.18	81.07	156.78	136.23	120.89	108.41	97.90

GRAFICO 2A: CORTANTE PARA DISTORSION DE H800 vs V/L/M

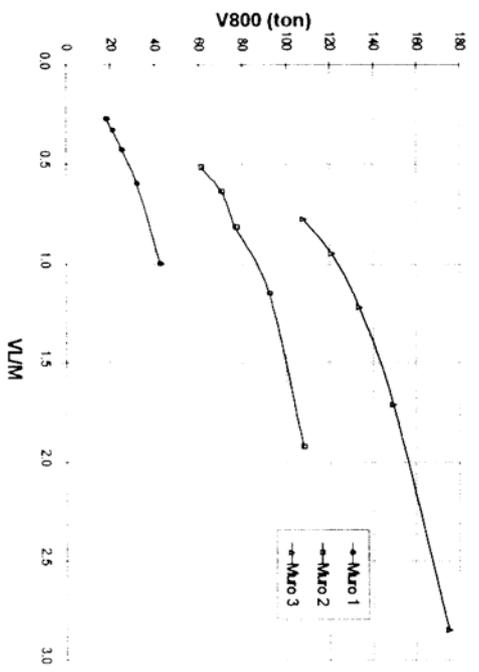


GRAFICO 2B: ESF. CORTANTE PARA DISTORSION DE H800 vs V/L/M

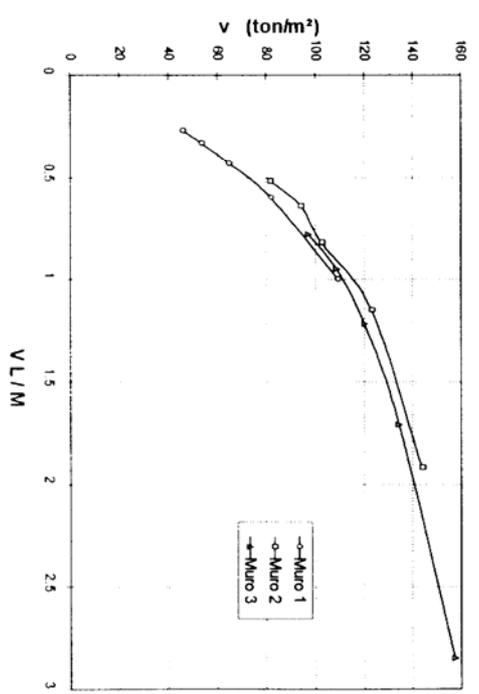


GRÁFICO No 2

La nomenclatura utilizada en la tabla correspondiente al Gráfico 2 es la siguiente:

- D = desplazamiento del primer nivel obtenido mediante el programa SAP90, para V=15.6 ton.
- D800 = desplazamiento correspondiente al instante en que el muro se agrieta diagonalmente.
- D800 / D = relación entre los valores h/800 y D del muro correspondiente.
- V L / M = inversa de la relación de esbeltez.
- V800 = fuerza total requerida para que la estructura alcance un desplazamiento h/800.
- τ = esfuerzo cortante promedio en el primer nivel para la condición en que se alcanza un desplazamiento h/800 en el primer nivel = V800 / L t

8. CONCLUSIONES

Admitiéndose que la falla por fuerza cortante se produce al alcanzar un determinado nivel del esfuerzo de tracción principal (constante para todas las condiciones de carga y de esbeltez), se concluye que los muros esbeltos tienen una menor resistencia unitaria al esfuerzo cortante que los muros cuadrados. Lo propio ocurre cuando se asume que todos los muros fallan por corte cuando alcanzan una distorsión angular igual a 1/800 en el primer piso. De esta manera, se puede decir que los efectos de esbeltez aceleran la formación de las grietas diagonales en los muros de albañilería.

Para contemplar los efectos de esbeltez sobre la resistencia a fuerza cortante, se propone: multiplicar el valor de la resistencia al corte de los muros cuadrados (usualmente determinados en forma experimental) por un factor de reducción de resistencia " α ", similar al calculado experimentalmente en la Ref. 3. De esta manera, se tiene:

$$\tau = \tau_o (\alpha)$$
$$1/3 \leq \alpha = \frac{VL}{M} \leq 1$$

Donde:

τ_o es el valor unitario de la resistencia al corte de un muro cuadrado = $V_o / L t$

τ es la resistencia unitaria al corte de un muro con cierta esbeltez ($M / V L$)

L es la longitud del muro, incluyendo el peralte de las columnas de confinamiento

V y M son la fuerza cortante y momento flector, respectivamente, del análisis estructural elástico.

Sin embargo, es necesario indicar que esta relación tiene que ser complementada con otros estudios y experimentos, ya que el análisis realizado en este trabajo corresponde a un elemento compuesto por dos materiales elásticos, homogéneos e isotrópicos, propiedades que estrictamente hablando no son aplicables a la albañilería confinada. En los modelos utilizados no se consideró bajo ningún aspecto la existencia de juntas verticales u horizontales, las que crean planos potenciales de falla.

Por la razón expuesta en el párrafo anterior, la expresión proporcionada para evaluar la resistencia al corte contempla un margen de seguridad, especialmente para el caso de los muros no esbeltos, ya que realmente la distorsión asociada al agrietamiento diagonal (1/800) es tan sólo un valor referencial; asimismo, aceptar que independientemente de la esbeltez que tenga el muro, la fractura se produzca para el mismo esfuerzo de tracción

principal, es tan solo una hipótesis; pero, a pesar de todas estas simplificaciones, se ha demostrado teóricamente el comportamiento experimental que tuvieron los muros ensayados en la Universidad Católica (Refs. 1 y 2), donde se produjo la reducción de la resistencia unitaria al corte ocasionada por la esbeltez de los muros.

REFERENCIAS

1. Efectos de la esbeltez en la resistencia al corte de la albañilería confinada. A. Macciotta y D. Torrealva. Libro de Ponencias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Cajamarca, 1986.
2. Comportamiento sísmico de un modelo a escala reducida de albañilería confinada de tres pisos. A. San Bartolomé y D. Quiun. Libro de Ponencias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Piura, 1990.
3. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. A. San Bartolomé. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. 1994.

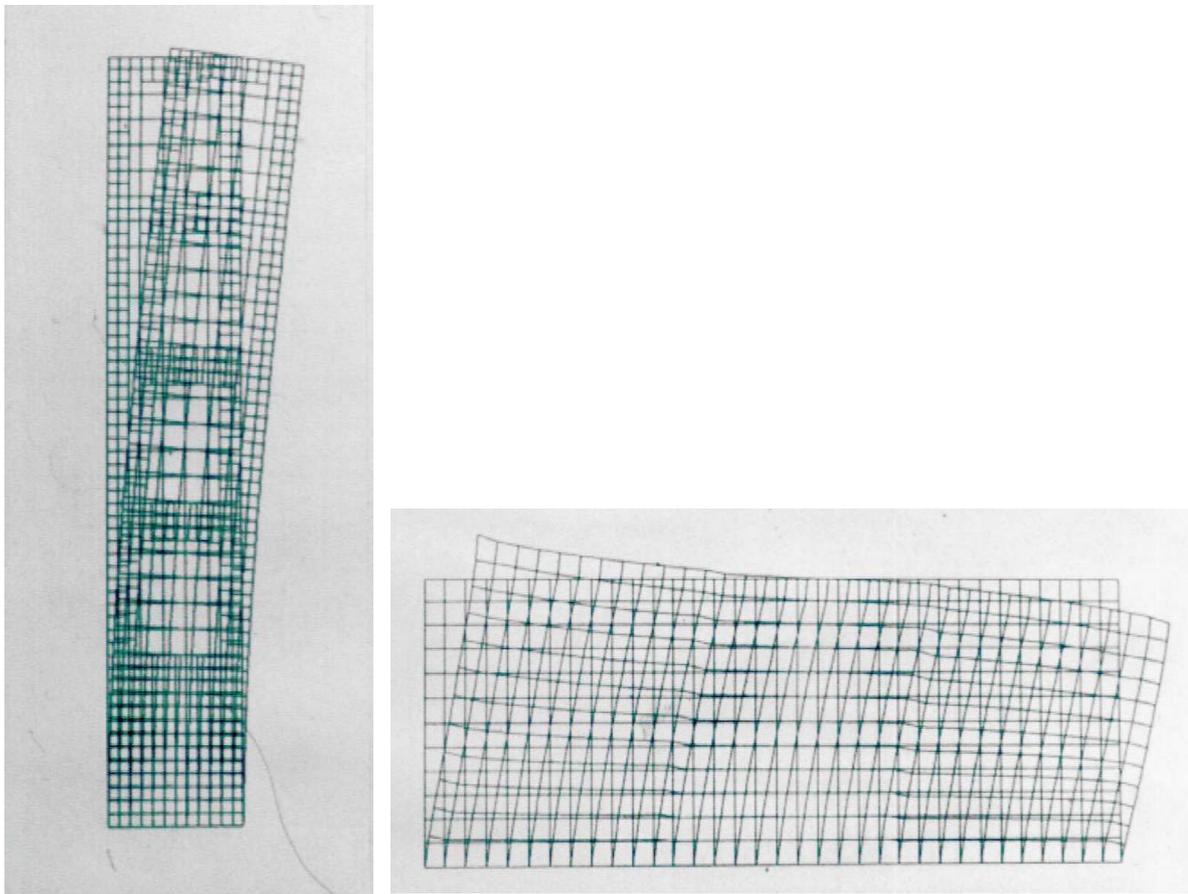


Fig.4. Configuración deformada de los muros: 1 paño-5 pisos (izquierda) y 3 paños-3 pisos (derecha).