

# CORRECCIÓN POR ESBELTEZ EN PILAS DE ALBAÑILERÍA ENSAYADAS A COMPRESIÓN AXIAL. PROYECTO SENCICO-PUCP.

Por: Daniel Quiun, Ángel San Bartolomé y Giuseppe Mendoza  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## RESUMEN

Con el apoyo financiero de SENCICO, se ensayaron a compresión axial 60 pilas de albañilería, construidas con unidades de arcilla y de concreto, con el objeto de determinar experimentalmente los coeficientes de corrección aplicables sobre la resistencia característica  $f'_m$  en pilas que presentan esbelteces distintas al valor nominal (5 para SENCICO, 2004; y, 2 para INDECOPI, 2003). Los resultados indicaron que los coeficientes de corrección tuvieron una mejor aproximación hacia los valores proporcionados por SENCICO, 2004, que hacia los valores especificados por INDECOPI, 2003 (que son iguales a los indicados por ASTM C 1314, 2003).

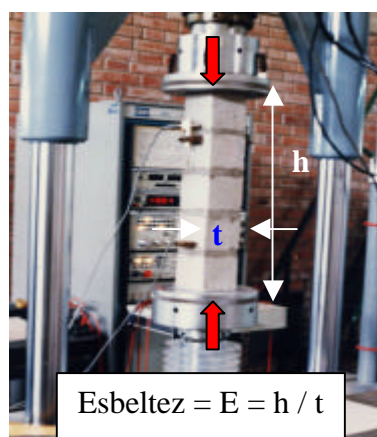
## 1. INTRODUCCIÓN

Las pilas de albañilería son prismas compuestos por dos o más hiladas de unidades enteras (ladrillos o bloques) asentadas una sobre la otra mediante mortero, con una altura total que no debe ser excesiva a fin de facilitar su construcción, almacenaje y transporte desde la obra hacia un laboratorio. Estas pilas, con una edad nominal de 28 días, se ensayan a compresión axial y los resultados se utilizan para diseñar estructuralmente los muros de un edificio, así como para controlar la calidad de la construcción de la albañilería.

Sin embargo, la resistencia característica a compresión axial de las pilas ( $f'_m$ ) depende de la relación altura-espesor o esbeltez (Fig.1), por lo que la norma nacional de Albañilería E.070 (ININVI, 1982 y SENCICO, 2004), adopta un valor nominal de esbeltez igual a cinco. Para otras esbelteces, se especifica coeficientes que se aplican sobre la resistencia respectiva, para de este modo estimar la resistencia que se obtendría con la esbeltez nominal.

Puesto que los coeficientes de ININVI, 1982, no tienen respaldo experimental y son distintos a los especificados por normas extranjeras (NCh, 1993; NSR, 1998) e incluso por la norma nacional INDECOPI, 2003 (con coeficientes iguales a los indicados por la norma ASTM C 1314, 2003), en este proyecto se pretende obtener en forma experimental factores de corrección para  $f'_m$  adecuados a nuestra realidad.

Fig.1  
Pila de albañilería  
sujeta a  
compresión axial.



## 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Con la finalidad de evitar la influencia de parámetros ajenos a la variable en estudio, se utilizaron materiales de calidad definida, que se emplean en la construcción de muros portantes de albañilería armada y confinada en el Perú. Los ensayos respectivos fueron ejecutados en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (INF-LE 118, 2005) y en este artículo sólo se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

### 2.1. Características de las Unidades de Albañilería

En este proyecto se utilizaron 4 tipos de unidades (ver la identificación en la Fig.2): tres de ellas fueron ladrillos sólidos (de arcilla y de concreto) que se utilizan en la construcción de muros de albañilería confinada, en tanto que la cuarta unidad fue un bloque de concreto vibrado que se utiliza en la construcción de muros de albañilería armada. Los ladrillos empleados fueron del tipo King Kong industrial y artesanal, mientras que el bloque fue del tipo industrial.



Fig.2. Unidades de albañilería empleadas, de izquierda a derecha: 1) King Kong Artesanal de arcilla (KKA); 2) King Kong Industrial de arcilla (KKI); 3) King Kong industrial de Concreto (KKC); y, 4) Bloque de Concreto Vibrado (BCV).

Debe mencionarse que inicialmente se adquirieron ladrillos KKI sólidos de arcilla procedentes de una fábrica reconocida. Al someter estas unidades a la prueba de compresión, los resultados oscilaron entre 195 a 322 kg/cm<sup>2</sup>. Debido a esta gran dispersión, hubo que cambiar de fábrica.

Los ensayos realizados (Fig.3) para clasificar a las unidades: variación dimensional, alabeo y compresión axial, así como las pruebas adicionales: absorción y porcentaje de huecos, proporcionaron los resultados mostrados en la Tabla 1.



Fig.3. Ensayos de la unidad de albañilería. De izquierda a derecha: Variación de dimensiones, alabeo y compresión.

<b>Tabla 1. Características de las Unidades de Albañilería</b>				
<b>Unidad</b>	<b>KKA</b>	<b>KKI</b>	<b>KKC</b>	<b>BCV</b>
Resistencia a compresión $f'b$ en $\text{kg/cm}^2$ (*)	83 (21%)	213 (11%)	157 (14%)	97 (4%)
Absorción en 24 horas de inmersión	12%	15%	6%	5%
Porcentaje de huecos	0%	31%	30%	44%
Dimensiones promedios LxBxH (mm) y variación dimensional (%)	212x119x98 (-1%, 1%, 2%)	243x131x93 (-1%,-1%,-3%)	240x130x91 (0%, 0%, -1%)	390x140x190 (0%, 0%, 0%)
Alabeo (mm)	1	2	0	---

(\*) *La resistencia característica  $f'b$ , sobre el área bruta, fue obtenida restando una desviación estándar a la resistencia promedio. Entre paréntesis se indica la dispersión porcentual de resultados.*

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 1 y según SENCICO, 2004, estructuralmente el ladrillo KKA es clase II, el ladrillo KKI es clase V, el ladrillo KKC es clase IV y el bloque BCV es clase P. Por lo cual, todas las unidades son aptas para la construcción de muros portantes, aparte que los ladrillos calificaron como unidades sólidas.

## 2.2. Mortero

Las unidades de concreto (KKC y BCV) se asientan secas, por lo que debido a su alta porosidad, fue necesario emplear un mortero con cal hidratada y normalizada a fin de aumentar su retentividad; para las pilas construidas con estas unidades se utilizó un mortero en proporción volumétrica cemento-cal-arena 1: ½ : 4. Para el caso de las unidades de arcilla (KKA y KKI), asentadas húmedas, el mortero tuvo una proporción volumétrica cemento-cal-arena 1: 0: 4.

En todos los casos el cemento utilizado fue Pórtland tipo I y la arena fue gruesa. Por otro lado, mientras se construyeron las pilas, se fabricaron 5 probetas cúbicas por cada tipo de mortero, de 5 cm de arista. Estas probetas fueron curadas en agua y después de cumplir 28 días de edad fueron ensayadas a compresión axial (Fig.4), a una velocidad de desplazamiento entre los cabezales de la máquina universal de 1 mm/min. Los resultados promedios, así como la dispersión porcentual de resultados, aparecen en la Tabla 2.



Fig.4. Mortero. De izquierda a derecha: mezcla con cal, ensayo de compresión y probetas ensayadas.

<b>Tabla 2. Resistencia a Compresión del Mortero</b>		
Proporción volumétrica	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Coefficiente de variación
1: ½ : 4 (con cal)	144	9.1%
1: 0: 4 (sin cal)	143	5.0%

### 2.3. Concreto Líquido (Grout)

Las celdas de las pilas hechas con bloques de concreto vibrado (BCV) fueron rellenas con grout en proporción volumétrica cemento: arena: confitillo 1: 2 ½ : 1 ½, preparado en una mezcladora con un slump de 10 pulgadas (Fig.5).

Al instante de efectuar el vaciado, se prepararon 4 probetas de grout de 10x10x19 cm, empleando como moldes a los bloques forrados con papel filtro, de tal modo que se permita una transferencia natural del agua del grout hacia los bloques. Estas probetas no fueron curadas, sino que se mantuvieron en los moldes durante 28 días, para posteriormente ensayarlas a compresión a una velocidad de carga de 5 ton/min. La resistencia promedio fue  $f'c = 202 \text{ kg/cm}^2$ , con una dispersión de resultados de 14%.



Fig.5. Grout. De izquierda a derecha: slump, moldes con papel filtro, ensayo de compresión y forma de falla de una probeta ensayada.

## 3. CARACTERÍSTICAS DE LAS PILAS

### 3.1 Número de Hiladas

Para definir la altura de las pilas de albañilería, se consideró lo siguiente:

- La facilidad constructiva empleando un número entero de unidades, el almacenaje en obra, la facilidad en el transporte desde la obra hasta un laboratorio, la maniobrabilidad en el laboratorio a fin de aplicarles capping e instalarlas en la máquina de ensayos. Así, por ejemplo, se descartaron las pilas de 5 hiladas hechas con bloques de concreto vibrado (BCV) por ser muy grandes y pesadas.
- El rango de esbelteces y la esbeltez nominal especificada por SENCICO, 2004.

Considerando los puntos mencionados, las pilas hechas con ladrillos de arcilla (KKA y KKI) y de concreto (KKC) tuvieron 2, 3, 4 y 5 hiladas, mientras que las pilas hechas con bloques de concreto vibrado (BCV) tuvieron 2, 3 y 4 hiladas.

### 3.2. Identificación de las Pilas

Por cada esbeltez y por cada tipo de unidad, se construyeron 4 pilas, lo que proporcionó un total de 60 pilas (Fig.6). Cada pila fue identificada por la unidad utilizada (U), el número de hiladas



(nH) y un dígito (i = 1 a 4): U – nH - i. Por ejemplo, la pila KKA-3H-2 es de ladrillo King Kong Artesanal, de 3 hiladas, siendo la segunda de una serie compuesta por 4 pilas.

Fig.6  
Total de pilas  
construidas



#### 4. CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS

Antes del asentado, las unidades fueron seleccionadas eliminando aquellas que presentaban fisuras, o estaban mal cocidas, para posteriormente limpiarlas. En todos los casos, las juntas horizontales de mortero cubrieron toda la superficie de asentado de la unidad (Fig.7) y tuvieron un grosor nominal de 1 cm. Este grosor fue controlado mediante un escantillón (regla graduada), mientras que la verticalidad fue controlada con una plomada.

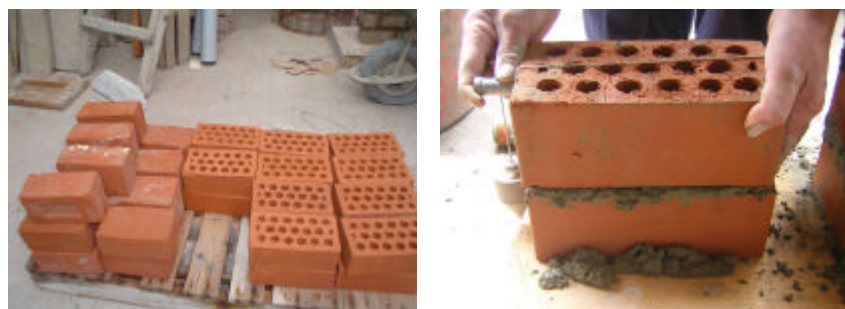


Fig.7. Mortero cubriendo la superficie de asentado. De izquierda a derecha: ladrillo de arcilla, ladrillo de concreto y bloque de concreto.

##### 4.1. Pilas con Unidades de Arcilla

Los ladrillos de arcilla (KKA y KKI, Fig.8) fueron regados durante media hora, unas 10 horas antes de asentarlos, con el objeto de disminuir su elevada succión natural, de modo que al instante de asentarlos, su superficie esté relativamente seca (para que succione el cementante del mortero) y su núcleo esté saturado (para que el agua existente en el núcleo sirva para curar al mortero). En estos casos se utilizó mortero 1: 0: 4 (sin cal).

Fig.8  
Ladrillos de arcilla  
humedecidos (izq.)  
y construcción de  
pilas (der.).



## 4.2. Pilas con Unidades de Concreto

Las unidades de concreto (KKC y BCV) se asientan en seco (en su estado natural, Figs. 9 y 10), puesto que debido a su alto coeficiente de variación volumétrica, podrían expandirse al regarse para luego contraerse al secarse, lo que causaría fisuras en los muros. Debido a que estas unidades presentan elevada porosidad, fue necesario emplear mortero con cal, en proporción volumétrica 1: ½ : 4 para elevar la retentividad del mortero.

Para el caso de las pilas construidas con bloques de concreto, las celdas fueron rellenas con concreto líquido (grout) en proporción volumétrica cemento: arena: confitillo 1: 2 ½ : 1 ½, con un slump de 10 pulgadas. El grout fue vaciado y compactado con una varilla lisa de ½” al día siguiente de haberse construido las pilas de albañilería.

Fig.9

Secuencia en la construcción de pilas con ladrillos de concreto KKC. Limpieza (izq.) y asentado (der.)



Fig.10

Secuencia en la construcción de pilas con bloques de concreto BCV. Pilas vacías (izq.) y compactación del grout (der.).



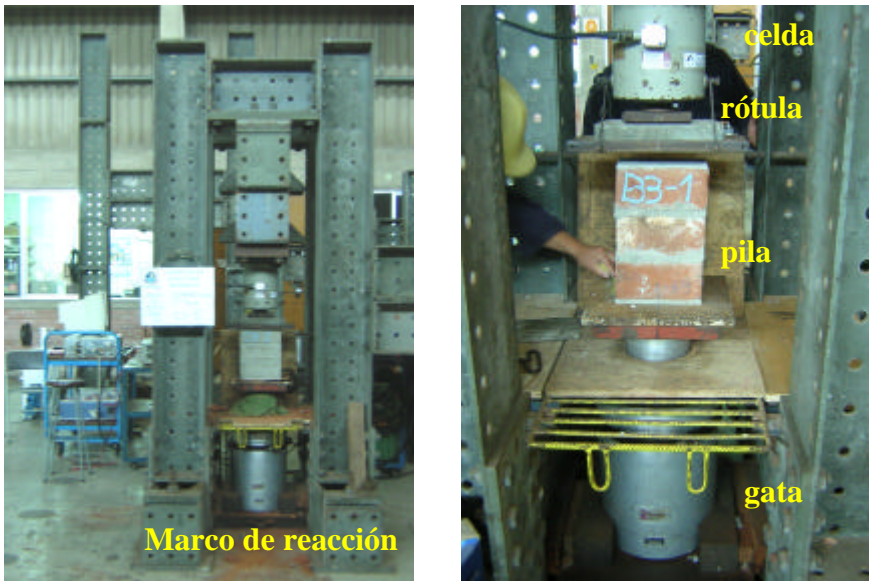
## 5. TÉCNICA DE ENSAYO

Luego de que las 60 pilas cumplieren 28 días de edad, fueron ensayadas a compresión axial a una velocidad de carga de 4 ton/min. Previamente, se aplicó un capping de yeso-cemento, de unos 3 mm de espesor, en las caras en contacto con los cabezales del equipo de ensayo.

Para el caso de las pilas rellenas con grout, la edad se contabilizó a partir del día en que se efectuó el vaciado del grout. Adicionalmente, todas las pilas fueron almacenadas en un lugar techado para protegerlas del sol y la lluvia.

El equipo de ensayo (Fig.11) consistió de una celda de carga y una gata hidráulica, ambas de 200 ton de capacidad, accionada con una bomba eléctrica. Tanto la celda como la gata, concéntricas con la pila, apoyaban sobre un pórtico metálico de reacción. La carga fue aplicada hasta provocar la rotura de las pilas, instante después del cual se produjo la degradación de resistencia. Esta carga máxima fue registrada por un voltímetro conectado a la celda de carga.

Fig.11  
Equipo de ensayo.



**6. FORMAS DE FALLA DE LAS PILAS**

En las figuras 12 a 15 se muestra las formas de falla de las distintas pilas ensayadas a compresión axial. En todos los casos la falla fue frágil. Para el caso de las unidades KKI, las caras laterales tendieron a deslaminarse. Para el caso de las unidades KKC, las grietas verticales tendieron a pasar por las ranuras del ladrillo. Para el caso de las unidades BCV, se notó poca adherencia en la interfase grout-bloque.

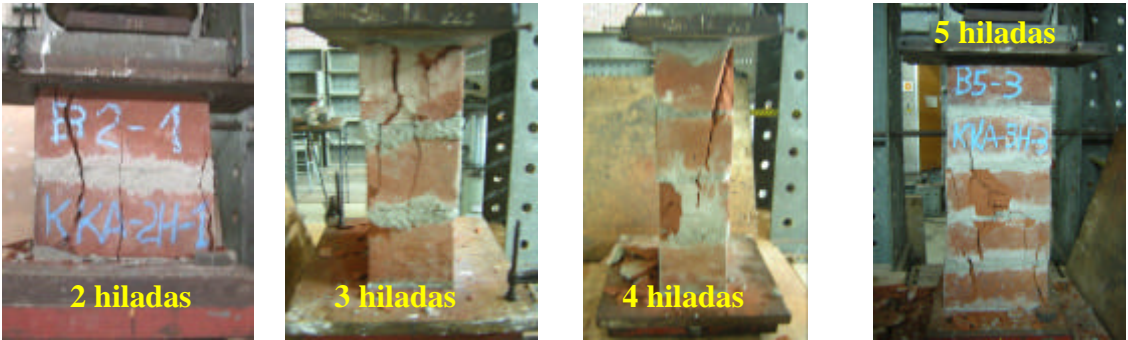


Fig.12. Pilas de ladrillo artesanal KKA.



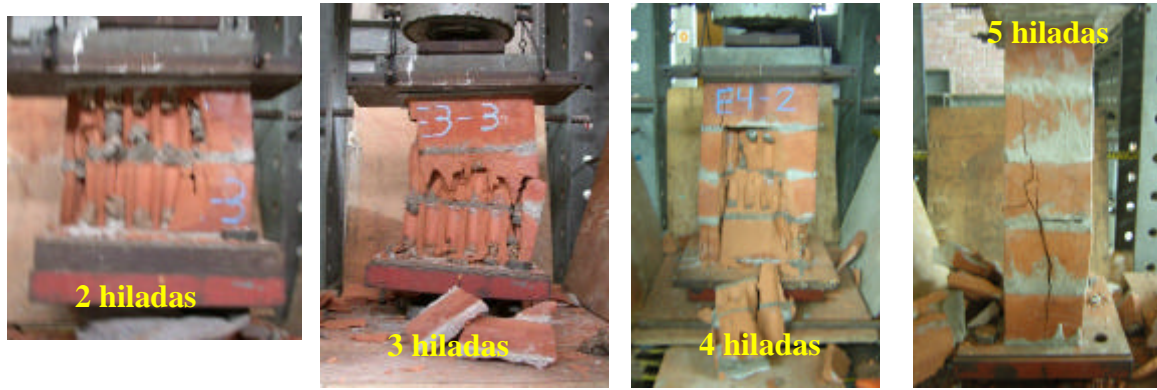


Fig.13. Pilas de ladrillo industrial KKI.

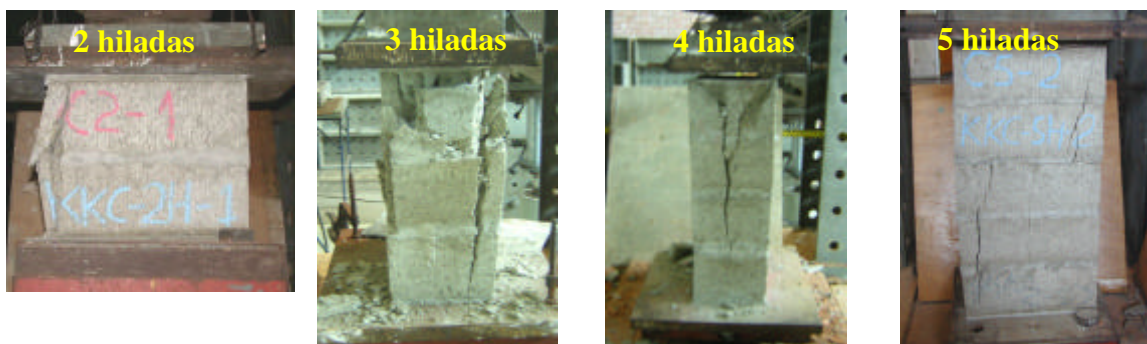


Fig.14. Pilas de ladrillo de concreto KKC.

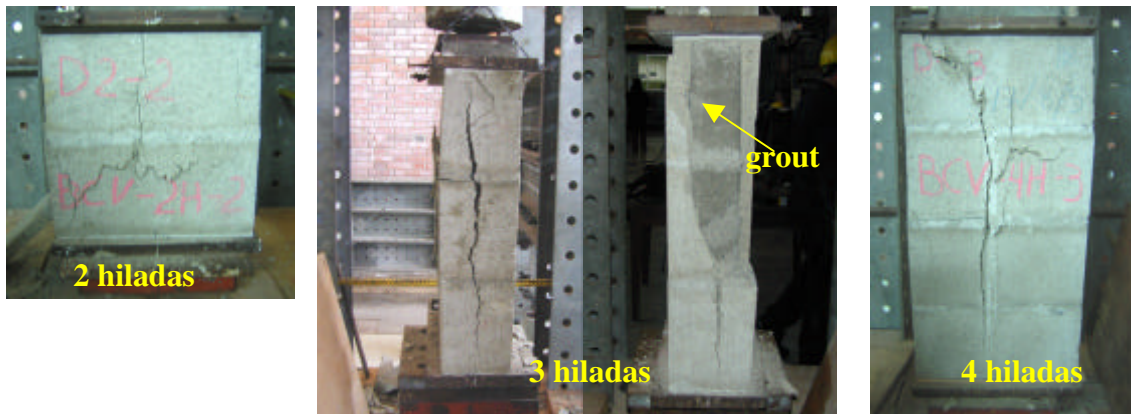


Fig.15. Pilas de bloques de concreto BCV.

## 7. RESULTADOS NUMÉRICOS

En la Tabla 3 se indica para las 60 pilas ensayadas a compresión axial: la altura de la pila ( $h$ ), su espesor ( $t$ ), la esbeltez ( $E = h/t$ ), el área de la sección transversal ( $A$ ), la carga máxima soportada ( $P$ ), la carga máxima promedio ( $P_m$ ) y la dispersión porcentual ( $D$ ) de resultados para cada serie. Esta dispersión se calculó dividiendo una desviación estándar entre la resistencia promedio (coeficiente de variación).



<b>Tabla 3. Carga máxima (kN) en cada pila. Datos no depurados.</b>								
UNIDAD	h (mm)	E = h/t	P1	P2	P3	P4	Pm	D (%)
KKA t = 119 mm A = 252 cm <sup>2</sup>	220 – 2H	1.85	183.75	186.76	181.74	167.68	179.98	4.7
	332 – 3H	2.79	<b>130.26</b>	141.01	158.53	136.54	141.585	8.6
	<b>438 – 4H</b>	<b>3.68</b>	<b>141.84</b>	<b>174.16</b>	<b>90.77</b>	<b>97.99</b>	<b>126.19</b>	<b>31.0</b>
	546 – 5H	4.59	123.50	<b>164.67</b>	154.63	124.51	141.83	14.8
KKI t = 131 mm A = 318 cm <sup>2</sup>	210 – 2H	1.60	415.93	441.08	480.32	514.54	462.97	9.4
	313 – 3H	2.39	386.76	<b>380.73</b>	471.26	466.23	426.24	11.5
	425 – 4H	3.24	379.89	454.30	456.30	389.90	420.10	9.7
	524 – 5H	4.00	398.83	442.08	352.57	371.68	391.29	9.9
KKC t = 130 mm A = 312 cm <sup>2</sup>	<b>203 – 2H</b>	<b>1.56</b>	<b>303.30</b>	<b>292.26</b>	<b>352.57</b>	<b>263.11</b>	<b>302.06</b>	<b>12.3</b>
	<b>305 – 3H</b>	<b>2.35</b>	<b>390.74</b>	<b>337.58</b>	<b>360.47</b>	<b>355.77</b>	<b>361.14</b>	<b>6.1</b>
	<b>407 – 4H</b>	<b>3.13</b>	<b>341.70</b>	<b>308.54</b>	<b>355.77</b>	<b>334.66</b>	<b>335.17</b>	<b>5.9</b>
	<b>505 – 5H</b>	<b>3.89</b>	<b>344.53</b>	<b>405.87</b>	<b>394.81</b>	<b>377.71</b>	<b>380.73</b>	<b>7.0</b>
BCV t = 140 mm A = 546 cm <sup>2</sup>	402 – 2H	2.87	562.86	578.97	<b>590.05</b>	541.72	568.40	3.7
	603 – 3H	4.30	450.13	511.52	<b>444.10</b>	476.29	470.51	6.5
	798 – 4H	5.70	462.21	<b>489.38</b>	474.28	434.04	464.98	5.0

## 8. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

A fin de obtener los coeficientes de corrección (CC) por esbeltez, los resultados que aparecen en la Tabla 3 fueron procesados siguiendo los siguientes pasos:

1. **Depuración de Resultados.** Los resultados inconsistentes (resaltados con negrilla en la Tabla 3) fueron eliminados de tal modo que por lo menos queden 3 pilas o ninguna en cada serie. Debe entenderse por resultado inconsistente aquél valor máximo o mínimo que no guarde coherencia con el resultado esperado; por ejemplo, toda la serie KKC fue eliminada debido a que las pilas más esbeltas soportaban más carga axial que las pilas menos esbeltas, lo cual es incongruente. Asimismo, toda la serie KKA-4H fue eliminada por la elevada dispersión de resultados obtenida (más de 30%).
2. **Cálculo de  $f'_m$ .** Trabajando con los resultados depurados, la resistencia característica a compresión axial ( $f'_m$ , SENCICO, 2004) fue evaluada restando a la resistencia promedio una desviación estándar. La resistencia unitaria promedio fue calculada como la carga máxima promedio dividida entre el área bruta de la pila (A, ver Tabla 3).
3. **Evaluación de  $f'_m$  para una Esbeltez Normalizada de 5.** La esbeltez estándar que utiliza SENCICO, 2004 es  $E = 5$ ; puesto que ninguna serie tuvo esa esbeltez, hubo que predecir el valor  $f'_m$  ( $E = 5$ ) por interpolación lineal de los resultados experimentales depurados.
4. **Coefficiente de Corrección por Esbeltez (CC).** Para cada serie el coeficiente de corrección se calculó como  $CC = f'_m (E = 5) / f'_m (E)$ .
5. **Curva de Ajuste para CC.** Utilizando los puntos experimentales E-CC, se trazó una curva polinómica de ajuste, la misma que aparece en el Gráfico 1.

En la Tabla 4, aparecen los resultados del coeficiente de corrección por esbeltez (CC).

<b>Tabla 4. Evaluación del Coeficiente de Corrección por Esbeltez (CC).</b>					
UNIDAD	E = h/t	Pm (kN)	Dispersión	f'm (kg/cm <sup>2</sup> )	CC
KKA	1.85	179.98	4.7 %	67.99	0.657
	2.79	145.36	8.0 %	53.01	0.842
	4.59	134.21	13.2 %	46.19	0.966
	5.00	---	---	44.64	1.000
KKI	1.60	462.97	9.4 %	131.80	0.756
	2.39	441.42	10.7 %	123.77	0.805
	3.24	420.10	9.7 %	119.13	0.837
	4.00	391.29	9.9 %	110.73	0.900
	5.00	---	---	99.68	1.000
BCV	2.87	561.18	3.3 %	99.36	0.815
	4.30	479.31	6.4 %	82.14	0.986
	5.00	---	---	81.01	1.000
	5.70	456.84	4.5 %	79.89	1.014

La curva de ajuste responde a la siguiente expresión:

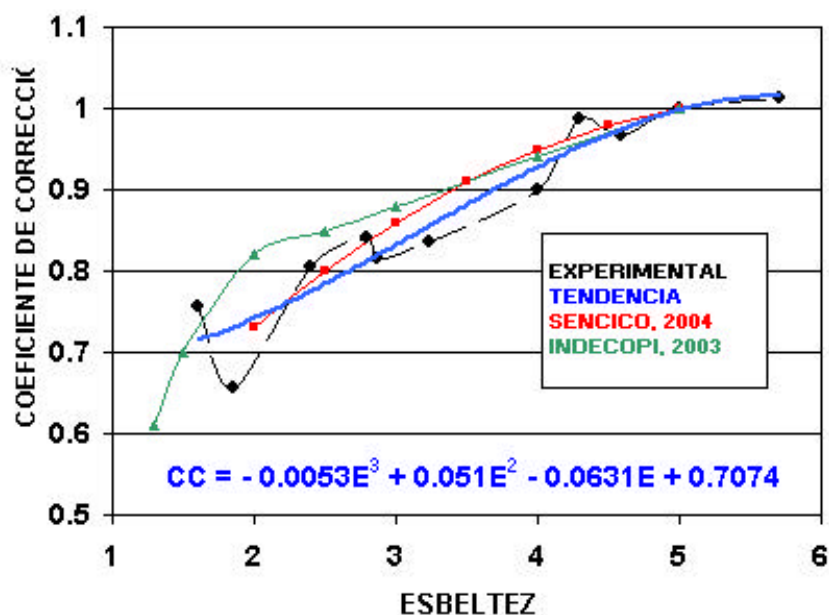
$$CC = -0.0053 E^3 + 0.051 E^2 - 0.0631 E + 0.7074 \text{ [ecuación 1]}$$

## 9. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LOS COEFICIENTES ESPECIFICADOS POR INDECOPI y SENCICO

Los coeficientes de corrección por esbeltez que especifica INDECOPI, 2003 (iguales a los indicados por ASTM C 1314, 2003) están normalizados para una pila con esbeltez E = 2, por lo que para efectos comparativos hubo que estandarizar estos coeficientes a una esbeltez E = 5, que es el valor nominal empleado por SENCICO 2004. Los valores de INDECOPI, 2003; SENCICO, 2004; y, de la ecuación 1, se presentan tanto en el Gráfico 1, como en la Tabla 5, donde además se indica la diferencia porcentual de los valores de ambas normas respecto a los obtenidos mediante la curva de ajuste.

<b>Tabla 5. Comparación de los Valores CC.</b>								
E = h/t	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	4.5	5.0
INDECOPI (original)	0.75	0.86	1.00	1.04	1.07	1.15	---	1.22
INDECOPI (E = 5)	0.61	0.70	0.82	0.85	0.88	0.94	---	1.00
SENCICO	---	---	0.73	0.80	0.86	0.95	0.98	1.00
Ecuación 1	0.70	0.71	0.74	0.79	0.84	0.93	0.97	1.00
Diferencia SENCICO-Ecuación 1	---	---	-1%	+1%	+2%	+2%	+1%	0%
Diferencia INDECOPI-Ecuación 1	-13%	-1%	+11%	+8%	+5%	+1%	---	0%

**Gráfico 1. COEFICIENTE DE CORRECCIÓN DE  $f'm$  POR ESBELTEZ. Esbeltez Estándar = 5.**



En la Tabla 5 y en el Gráfico 1 puede apreciarse que los coeficientes de corrección proporcionados por SENCICO, 2004, se acercan en mayor grado a la curva de tendencia de los valores experimentales (ecuación 1) que los valores proporcionados por INDECOPI, 2003. Además, se aprecia que las diferencias se acentúan cuando las pilas son poco esbeltas ( $E < 3$ ).

## 10. CONCLUSIONES

- La curva de tendencia del coeficiente de corrección (CC) por esbeltez de las pilas de albañilería ensayadas a compresión axial, para 3 tipos distintos de unidades, mostró una buena aproximación hacia los valores de CC proporcionados por SENCICO, 2004; mientras que los valores especificados por INDECOPI, 2003 (iguales a los indicados por ASTM C 1314, 2003) se alejaron más de esta curva. Por tanto, es preferible emplear los valores de CC indicados por SENCICO, 2004, que son los mismos a los dados por ININVI, 1982.
- INDECOPI, 2003 (al igual que ASTM C 1314, 2003), utiliza una esbeltez nominal  $E = 2$  (donde  $CC = 1$ ), que corresponde aproximadamente a una pila compuesta por 2 ladrillos, mientras que la esbeltez estándar para SENCICO, 2004, es  $E = 5$ . Habiéndose comprobado experimentalmente que los valores de CC son muy sensibles para esbelteces menores que 3, resulta aconsejable que la esbeltez estándar sea la especificada por SENCICO, 2004 y que las pilas estén compuestas por lo menos por tres unidades de albañilería.
- Las pilas hechas con ladrillos de concreto industrial (KKC) mostraron resultados incoherentes, obteniéndose mayor resistencia a compresión en las pilas más esbeltas. Por tanto, es necesario continuar la investigación para este tipo de unidad, esta vez construyendo por lo menos 10 pilas por cada esbeltez, para analizar si la inconsistencia puede deberse a las ranuras que muestra esta unidad.



## **11. REFERENCIAS**

ASTM C 1314, 2003. Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms.

ININVI, 1982. Norma E-070 Albañilería. Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda. Perú.

INDECOPI, 2003. NTP 399.605. Método de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión de prismas de albañilería.

INF-LE 118, 2005. Informes del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, correspondientes a los especímenes de este Proyecto.

NCh, 1997. Norma Chilena Oficial 2123.Of97. Albañilería Confinada – Requisitos de diseño y cálculo. Instituto Nacional de Normalización. Chile.

NSR, 1998. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Título D – Mampostería Estructural. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Colombia.

SENCICO, 2004. Proyecto de Norma Técnica de Edificación E.070 “Albañilería”. Comité Técnico de la Norma E.070.