

# COMPORTAMIENTO DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA ANTE CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL

Elsa Cristina Peña Flórez\* Luis Eduardo Yamin L.\*\*

## RESUMEN

*Este artículo presenta los resultados de ensayos experimentales de columnas en perfiles de acero en lámina delgada sometidos a compresión pura. Se presentan e interpretan resultados de 12 elementos ensayados con diferentes relaciones de esbeltez. Los elementos fallan de acuerdo con lo esperado por pandeo local o pandeo global. Los esfuerzos axiales de compresión en la falla se comparan con los esfuerzos últimos analíticos dados por la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, obteniéndose en general una buena correlación de resultados. Se encontró que el método de ensamble de la sección, al igual que los esfuerzos residuales afectan considerablemente los esfuerzos axiales resistentes de columnas de acero en lámina delgada.*

## SUMMARY

*This paper presents results of experimental tests of thin walled steel columns under pure axial loading. Twelve different elements in terms of slender factors were tested. Typical failure modes correspond to expected ones such as global or local buckling. Ultimate axial compression stresses were compared with analytical expressions given by the national building code, Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, presenting a relatively good agreement of results. Fabrication details as well as residual stresses play an important role when estimating axial strength of thin walled steel columns.*

## 1 INTRODUCCION

El empleo de los primeros perfiles laminados en frío se inicia hacia 1784. Los primeros estudios de compresión axial sobre columnas fueron realizados por Euler en 1744; Lamarle en 1845; Considere y Von Karman a finales del siglo XIX y principios del XX y Shanley en 1947.

De los estudios realizados sobre columnas de acero en lámina delgada debe resaltarse el desarrollado por Karren y Winter en 1967, don-

de se consideró la influencia del trabajo en frío sobre las propiedades de las secciones transversales de los perfiles. Esto dió origen al concepto de áreas efectivas que posteriormente fue estudiado por Chajes, Britvec y Uribe (1968), generando formulaciones específicas para el cálculo de anchos efectivos. En estas investigaciones se pudo comprobar que las fórmulas empleadas por el Consejo de Investigaciones de columnas CRC "Column Research Council" (Johnston 1966) eran una buena aproximación de los datos experimentales, lo cual llevo a que las fórmulas se emplearan en la norma AISI

\* Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes; e-pena@uniandes.edu.co

\*\* Profesor asociado e Investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes; lyamin@uniandes.edu.co

(1980) "American Iron and Steel Institute" para el cálculo de la carga máxima resistente de cualquier perfil de acero laminado en frío. En su gran mayoría las investigaciones fueron orientadas por Winter de la universidad de Cornell (E.U).

Dat en 1980 realizó estudios con el fin de comparar los resultados experimentales con los teóricos, con lo cual pudo concluir que la fórmula de la AISI (1980) sobreestimaba y subestimaba algunos valores de carga resistente.

De este estudio se pudo ver que las columnas de calibre 14 (2,0 mm) presentaron una carga experimental menor a la teórica, lo cual dió origen a que en 1990 C.C. Weng y Teoman Pekoz decidieran continuar con el estudio empleando el mismo tipo de columnas pero con variaciones significativas en el espesor, fabricante y líneas de fabricación (laminado en caliente "hot rolled" y laminado en frío "cold rolled"). El estudio indicó resultados conservativos y no conservativos. Los valores no conservativos se dieron para calibres 11 (3,0 mm), 12 (2,5 mm), 13 (2,25 mm) y 14 (2,0 mm).

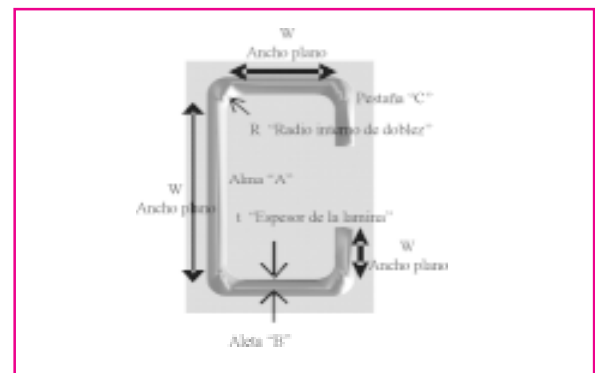
Posteriormente se realizaron un gran número de trabajos experimentales dirigidos en su gran mayoría por Wei-Wen Yu de la Universidad de Missouri-Rolla (E.U) y Teoman Pekoz de la Universidad de Cornell (E.U). Estos estudios dieron origen a formulaciones que se incluyeron en la AISI 1996 y que se emplean hoy en día para el diseño de perfiles de lámina delgada sometidos a cargas de compresión axial. En la actualidad se ha logrado comprobar que la formulación de la AISI sobreestima en algunos casos los valores de carga resistente de los perfiles, por lo cual se ha planteado la realización de varios estudios experimentales que ayuden a mejorar las ecuaciones normalmente empleadas.

En términos generales esta investigación busca establecer la relación entre los datos de falla teóricos y experimentales.

## 2 PERFILES DE LÁMINA DELGADA

Los perfiles de lámina delgada son elementos con espesores desde 0,4 mm hasta 6,4 mm, los cuales se utilizan principalmente en cubiertas, cerchas, correas, estructuras livianas y en algunos casos como elementos secundarios del sistema estructural.

Las características de los perfiles tipo C se presentan en la Figura 1. La sección transversal incluye alma, aletas y pestañas.



**Figura 1.** Características de los perfiles tipo C de lámina delgada

El ancho plano se define como la altura del elemento placa (Alma, Aleta y Pestaña) de la sección transversal menos los radios internos de doblar ubicados en las intersecciones de la lámina.

Estos perfiles se pueden trabajar en frío o en caliente. Para los primeros se considera un aumento en el punto de fluencia del material debido al trabajo en frío, con una consecuente disminución de la ductilidad. Este aumento de  $f_y$  por trabajo en frío es mayor en las esquinas de los elementos. Esto hace que se defina el concepto de áreas efectivas, las cuales, están alrededor de las esquinas redondeadas.

El uso de perfiles de lámina delgada generan grandes ventajas entre las que se pueden mencionar la economía, mejor apariencia arquitectónica, variedad de formas y tamaños, secciones livianas, facilidad de montaje y mejor relación resistencia/peso. Las desventajas que pre-

sentan se originan principalmente en el hecho de que necesitan un control de calidad cuidadoso, requieren una excelente protección contra la corrosión, son muy vulnerables al fuego y no es recomendable emplearlas como estructura principal en edificaciones mayores a cuatro pisos.

### 3 CRITERIOS DE FALLA A COMPRESIÓN AXIAL

Dado que los perfiles de lámina delgada se consideran elementos estructurales conformados por una serie de placas unidas entre si a lo largo de sus bordes, las cuales se pandean al ser sometidas a efectos de compresión, se hace necesario definir los diversos criterios de falla que pueden ayudar a establecer la carga a la cual pandea el elemento.

El pandeo de las columnas depende del tipo de apoyo y de la relación ancho-espesor de las placas que conforman la sección transversal.

Los aceros trabajados corresponden a materiales de calidad estructural que cumplen las normas NTC 3347 y ASTM A570-Grado 33, con un  $F_y = 23.2 \text{ Kg/mm}^2$ . Estos valores de esfuerzo de fluencia del material fueron verificados por medio de ensayos de probetas a tensión, obteniéndose los valores medios de  $F_y$  de la Tabla 1, los cuales varían con el espesor de la lámina.

**Tabla 1.** Valores experimentales del esfuerzo de fluencia del material " $F_y$ ".

Espesor	Esfuerzo de fluencia
mm	Kg/mm <sup>2</sup>
3,0	18,22
2,5	29,39
2,0	28,95
1,2	32,03

Para el cálculo del esfuerzo crítico de pandeo de placas sometidas a compresión la NACA "National Advisory Committee for Aeronautics" propone la siguiente ecuación:

$$F_{cr} = \frac{K \times \pi^2 \times E}{12 \times (1 - \nu^2) \times (b/a)^2} \dots\dots\dots (1)$$

En la cual  $E$  = módulo de elasticidad del acero (20400 Kg/mm<sup>2</sup>);  $\nu$  = relación de poisson (para el acero = 0.3);  $b$  = ancho de la placa;  $a$  = longitud de la placa paralela a la carga aplicada y  $K$  = es un factor que depende del tipo de apoyo.

Con base en las condiciones de apoyo de los elementos A, B y C de la Figura 1, se considera un  $K$  de 4 para los elementos A y B, esto indica una condición de "Apoyo articulado"; para el elemento C el valor de  $K$  es de 0.425, esto corresponde a un "Apoyo Articulado-Libre".

Otra falla importante en este tipo de perfiles es la típica falla por pandeo global, planteada por Euler de la siguiente manera:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \times E}{\frac{KL}{r}} \dots\dots\dots (2)$$

En la que para el caso  $K = 1$  ya que el sistema de apoyo utilizado en las bases de las columnas es tipo articulado.

Según la NSR-98 se debe definir el valor de esfuerzo máximo calculando la relación de esbeltez:

$$\lambda_c = \left( \frac{Kl}{r\pi} \right) \times \sqrt{\frac{F_y}{E}} \dots\dots\dots (3)$$

$\lambda_c \leq 1,5$  En la cual  $r$  = radio de giro en el eje débil de la sección transversal del perfil;  $l$  = longitud del perfil y  $F_y$  = esfuerzo de fluencia del material (23,2 kg/mm<sup>2</sup>).

Si el esfuerzo crítico de pandeo se presenta en el rango inelástico, por lo cual el esfuerzo se calcula con:

$$F_{cr} = 0,658^{\lambda_c^2} \times F_y \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda_c > 1,5$$

En caso contrario si, el esfuerzo crítico de pandeo ocurre en el rango elástico, por lo cual el

esfuerzo crítico del elemento se calcula con:

$$F_{cr} = \left( \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) \times F_Y \dots\dots\dots (5)$$

#### 4 PERFILES SELECCIONADOS PARA EL ENSAYO

En las Figuras 2 y 3 se presentan las secciones transversales de los perfiles seleccionados para los ensayos.

Básicamente se empleó la sección tipo C unida frente con frente para formar la sección cajón y espalda con espalda para conformar secciones abiertas.

Estos especímenes fueron suministrados por un solo fabricante. Los espesores de las láminas varían desde 3,0 mm hasta 1,2 mm.



Figura 2. Perfiles seleccionados para los ensayos.

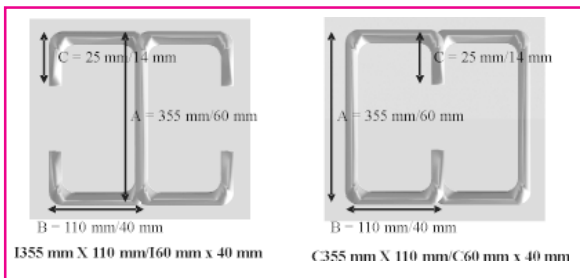


Figura 3. Geometrías de las secciones transversales de las columnas.

Se utilizaron secciones transversales de 60x40 mm y 355x110 mm. Las longitudes no sopor-

tadas de los elementos ensayados variaron entre 1.0 m y 1.5 m.

#### 5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS PERFILES

Para determinar las propiedades geométricas de los perfiles ensayados se empleó el método lineal, el cual consiste en definir la longitud total de la sección transversal del perfil, para posteriormente multiplicarla por el espesor, obteniendo así el valor del área transversal de cada perfil. Estas ecuaciones fueron tomadas de la AISI 1996 para el cálculo de las inercias de los elementos lineales y de los curvos. De acuerdo con esto se calcularon las áreas brutas, efectivas e inefectivas.

El concepto de área efectiva fue desarrollado por Karman en 1932 y consiste en suponer que la carga total la toma un ancho ficticio efectivo  $b$  sometido a un esfuerzo uniformemente distribuido igual al esfuerzo de los bordes  $f_{max}$ , como se muestra en la Figura 4.

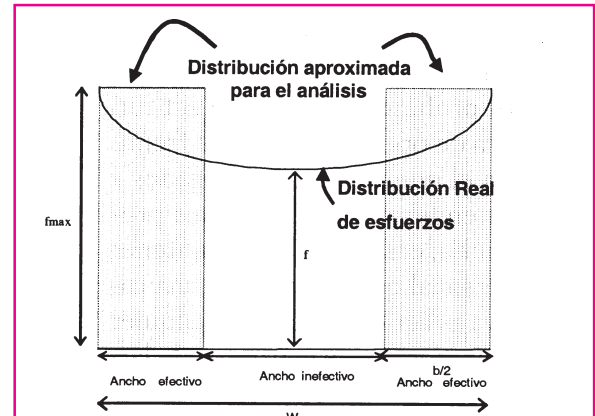


Figura 4. Áreas efectivas

$W$  es el ancho plano de cada lámina y  $b$  es el ancho efectivo de la sección transversal, calculado según las recomendaciones de la NSR-98.  $f_{max}$  es el esfuerzo máximo de la sección transversal, el cual disminuye paulatinamente hasta un punto medio del ancho inefectivo con un valor de  $f$ .

En la Tabla 2 se presentan las características geométricas de los perfiles ensayados.

Tabla 2. Dimensiones y propiedades de la sección transversales

Tipo de columna		Área Bruta	Área efectiva	Longitud
		mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm
Col 1	C60x40-2,0	591,84	591,84	1000
Col 2	C60x40-2,0	591,84	591,84	1500
Col 3	C60x40-1,2	364,44	355,51	1000
Col 4	I60x40-3,0	858,60	858,60	1500
Col 5	I60x40-2,0	604,40	591,84	1000
Col 6	I60x40-1,2	378,00	355,51	1000
Col 7	C355x110-3,0	3.600,60	2456,83	1500
Col 8	C355x110-2,5	3.012,65	1806,10	1000
Col 9	C355x110-2,0	2.419,84	1295,63	1000
Col 10	I355x110-2,5	3.020,50	1825,62	1000
Col 11	I355x110-2,5	3.020,50	1856,11	1500
Col 12	I355x110-2,0	2.432,40	2432,40	1000

En la nomenclatura empleada para identificar los perfiles ensayados la letra inicial indica el tipo de la sección (I “Abierta” y C “Cajón”); 355 y 60 es la dimensión en mm del elemento A; 110 y 40 indica la medida en mm del elemento B y 3.0, 2.5, 2.0 y 1.2 representan el espesor de la lámina. Los perfiles de 355 son catalogados como grandes y los de 60 como pequeños. Para los perfiles grandes la medida en mm del elemento C es de 25 mm y para los pequeños es de 14 mm. El radio de doblez interna de ambos tipos de perfiles es de 6 mm.

## 6 ENSAYOS

Las secciones entregadas por el fabricante vienen en longitudes de 6 metros, por lo cual se adelantaron los cortes requeridos mediante un disco de corte Rasta Suizo referencia 3318. Los extremos de las columnas fueron soldados en todo el perímetro de conexión con el apoyo tipo rótula, con el fin de garantizar una transmisión uniforme de esfuerzos. En la Figura 5 se observa el apoyo articulado empleado para los ensayos y el montaje de los perfiles.

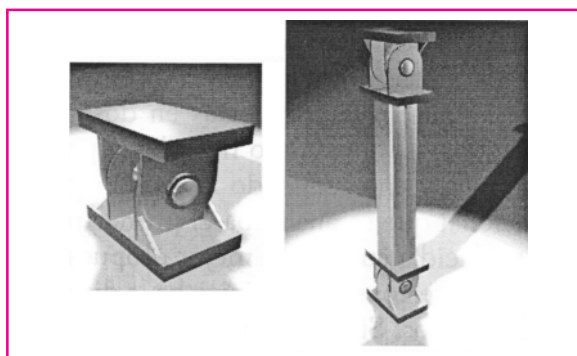


Figura 5. Sistema de apoyo tipo Rotula (Articulación) y montaje de los perfiles.

Los perfiles se conformaron mediante la unión de secciones tipo C con cordones de soldadura de alambre MIG 70S6 tal como se indica en la Figura 6. Se utilizaron cordones de soldadura de 5 cm separados cada 25 cm e intercalados para asegurar una buena unión entre las secciones.

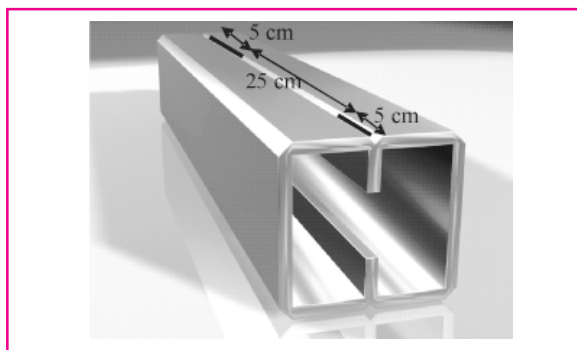
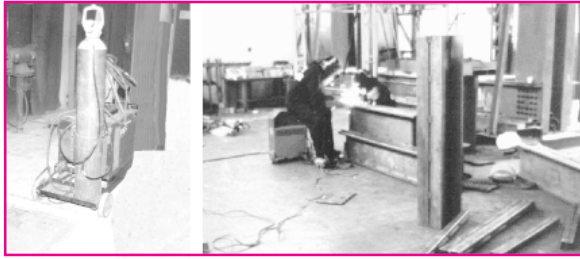


Figura 6. Soldadura Alambre MIG 70S6

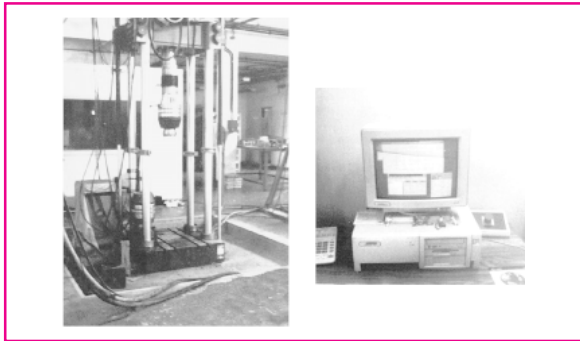
La soldadura MIG emplea un proceso de arco, formado entre un alambre sólido continuo y un charco metálico. La soldadura recomendada por el fabricante para este tipo de perfiles es E6013 de 1/8”. Para establecer la conveniencia de este tipo de soldadura se adelantaron pruebas de soldadura en el instituto de Soldadura West Arco con electrodos E6011, E6010, E6013 de 1/8” con lo cual se observó que este calibre de soldadura generaba en ocasiones huecos a la lámina de espesor pequeño, razón por la cual se optó por cambiar el tipo de soldadura.

El proceso de soldadura requiere de una mezcla de argón con  $\text{CO}_2$  almacenada en un tanque como se presenta en la Figura 7.



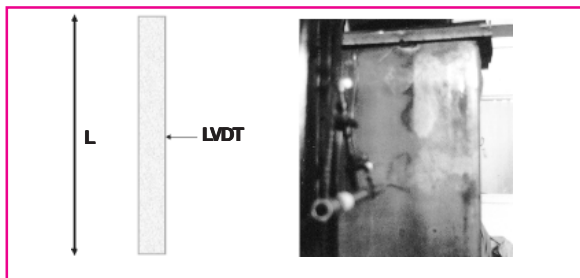
**Figura 7.** Equipo de soldadura MIG y proceso de soldadura

Para adelantar los ensayos se utilizó una máquina de ensayos MTS (Material Test System) totalmente servocontrolada (Ver Figura 8).



**Figura 8.** Máquina de ensayos (MTS)

La instrumentación utilizada incluye la instalación de transductores de desplazamiento (LVDT) a la mitad de la altura del elemento para medir los desplazamientos laterales del perfil tal como se indica en la Figura 9.

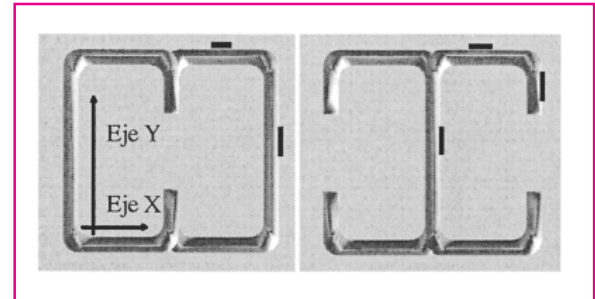


**Figura 9.** Localización de transductores en las columnas

Algunos de los perfiles fueron instrumentados adicionalmente con “strain gages” con el fin de conocer en detalle la distribución interna aproximada de esfuerzos en la sección. Estos

se colocaron en el alma y en la aleta para el tipo cajón, mientras que para el tipo abierto se incluyó uno adicional en la mitad de la longitud de la pestaña.

En la Figura 10 se muestra la disposición de los strain gages en los perfiles abiertos y cajón.



**Figura 10.** Disposición de los strain gages en los perfiles cajón y abierto

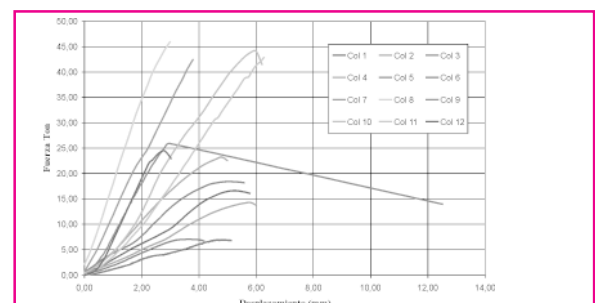
La carga axial se aplicó con desplazamiento controlado de 4 mm cada 0,5 seg. En primera instancia se aplicó una precarga de 500 kg y posteriormente se comenzó el proceso de carga de la columna.

Cada uno de los especímenes se alineó geoméricamente con respecto a la máquina de ensayo.

## 7 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En la Figura 11 se presentan las curvas fuerza-desplazamiento transversal de los perfiles ensayados.

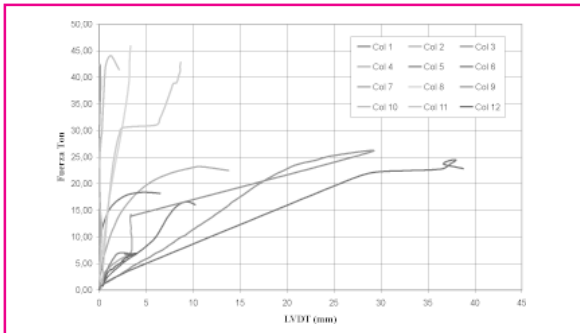
Se presentaron fallas por pandeo global (columnas # 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y fallas por pandeo local (Columnas # 7, 8, 9, 10, 11 y 12).



**Figura 11.** Curva Fuerza-Desplazamiento transversal

Las columnas # 7, 8 y 11 no alcanzaron la carga de falla por superar la capacidad máxima de la máquina de ensayos.

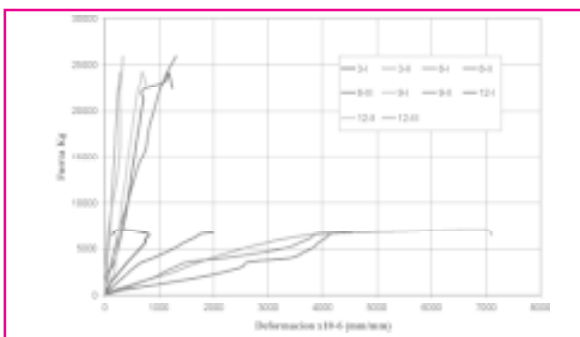
Al perfil # 9 “C355x110-2,0” se le aplicó carga por medio del método de carga controlada, lo cual hace que la curva salte en forma drástica, generando una falla súbita (ver Figura 11).



**Figura 12.** Curva Fuerza-LVDT

La Figura 12 muestra el desplazamiento transversal de las columnas ensayadas.

A los perfiles # 3, 6, 9 y 12 se le adicionaron medidores de deformaciones tipo “strain gages”.



**Figura 13.** Curva Fuerza-Deformación unitaria

La distribución y la nomenclatura de I, II y III de los “strain gages” en el perfil # 3 fue 1 en el alma y 2 en el aleta, para el # 6 fue 1 en la aleta, 2 en la pestaña y 3 en el alma, para el # 9 fue 1 en el aleta y 2 en el alma y para el # 12 fue 1 en el alma, 2 en la pestaña y 3 en la aleta. De las Figura 12 y 13 se pudo observar que el perfil # 6 tuvo una mayor deformación que las demás columnas ya que este presentó grandes imperfecciones iniciales.

En la Figura 14 se muestra la falla del perfil #9, donde se puede evidenciar el tipo de falla por pandeo con deficiencias en las soldaduras de unión entre los perfiles.



**Figura 14.** Falla del perfil # 9. Método de fuerza controlada

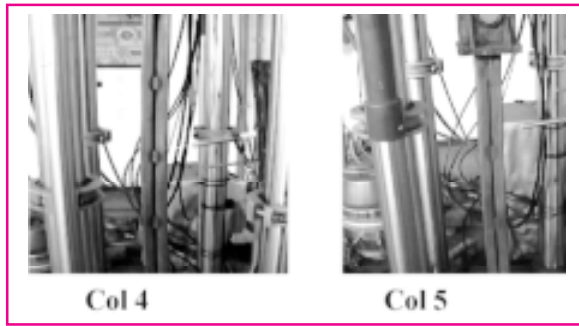
Los perfiles # 1 y # 4 presentaron pandeo global en el rango elástico, por lo cual al descargarlos estos recuperaron su forma inicial. La columna # 5 falló globalmente en el rango inelástico. La falla global de los perfiles se observa en las Figuras 15, 16, 17 y 18.



**Figura 15.** Falla por pandeo global de las columnas tipo cajón 1 y 2



**Figura 16.** Falla por pandeo local y global de la columna tipo cajón 3.

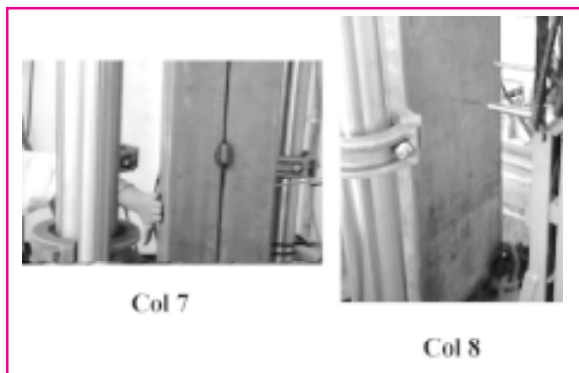


**Figura 17.** Falla por pandeo global de la columna tipo abierta 4 y 5.

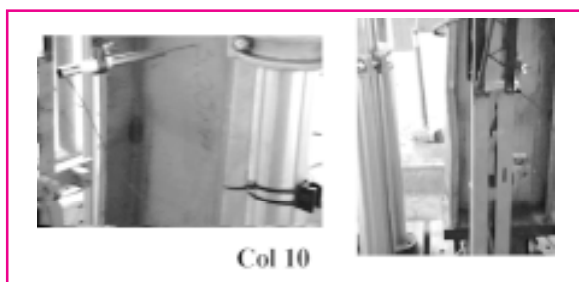


**Figura 18.** Falla por pandeo global y local de la columna tipo abierta 6.

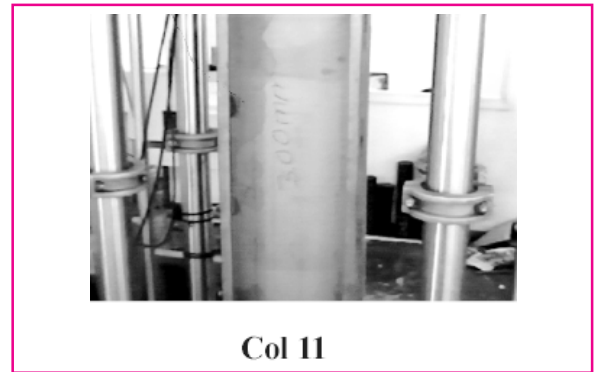
Los perfiles de 355x110 fallaron localmente por pandeo de placa generando barrigas de longitud  $L/3$ . Las fallas locales de los perfiles se ven en las Figuras 19, 20, 21 y 22.



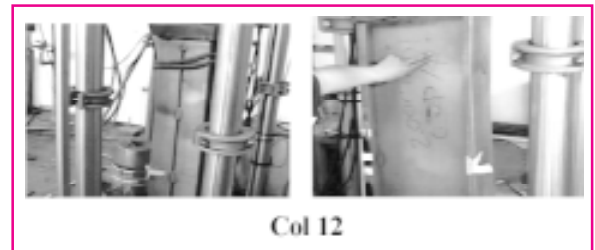
**Figura 19.** Falla local de las columnas tipo cajón 7 y 8.



**Figura 20.** Falla local de la columna tipo abierta 10.



**Figura 21.** Falla local de la columna tipo abierta 10.



**Figura 22.** Falla local de la columna tipo abierta 12. La falla local de la columna 9 se puede ver en la Figura 14.

En la Tabla 3 se comparan los resultados experimentales en términos de los esfuerzos últimos calculados con los datos experimentales y secciones nominales con respecto a los esfuerzos teóricos calculados de acuerdo con la norma NSR-98.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de las columnas

Tipo de Columna	Esfuerzo último Experimental	Esfuerzo último Teórico NSR-98
	Ton/mm <sup>2</sup>	Ton/mm <sup>2</sup>
Col 1 C60x40-2,0	16,61	12,92
Col 2 C60x40-2,0	14,25	11,98
Col 3 C60x40-1,2	7,03	7,77
Col 4 I60x40-3,0	23,20	14,61
Col 5 I60x40-2,0	18,39	11,91
Col 6 I60x40-1,2	6,94	7,13
Col 7 C355x110-3,0	58,00	56,25
Col 8 C355x110-2,5	46,00	41,66
Col 9 C355x110-2,0	25,95	29,88
Col 10 I355x110-2,5	44,02	41,08
Col 11 I355x110-2,5	42,00	40,20
Col 12 I355x110-2,0	24,50	29,40

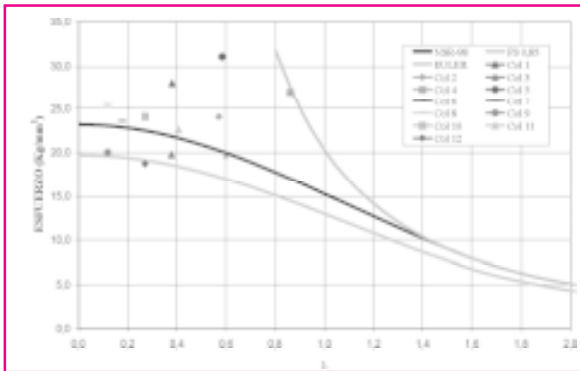
\* Los perfiles # 3, 6, 9 y 12 presentan un esfuerzo teórico mayor al experimental. Estos resultados se ven afectados por el método de ensayo.



En la Figura 23 se presentan los anteriores resultados en forma gráfica. En la figura se incluyen las gráficas de pandeo global de Euler y la curva teórica con un factor de reducción de 0.85.

Para los perfiles que no incluían medidores de deformaciones tipo strain gages la carga experimental obtenida fue menor a la calculada por la NSR-98.

Debe anotarse que para realizar las lecturas de strain gages se hizo necesario interrumpir el proceso de carga para realizar la toma de datos de deformaciones. Este factor puede afectar el resultado del ensayo produciendo una resistencia menor a la normalmente esperada.



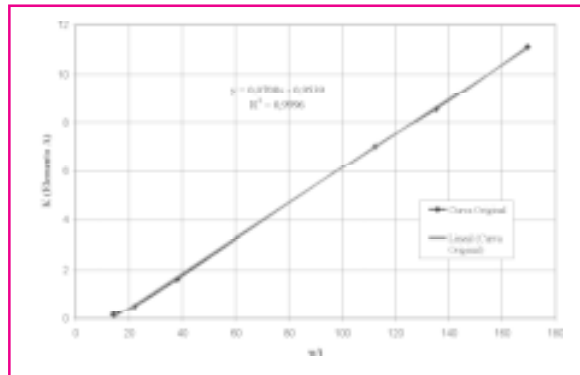
**Figura 23.** Comparación gráfica entre esfuerzos últimos experimentales y curva teórica según NSR-98.

De la figura anterior se puede concluir que usar un factor de seguridad de 0,85 es una buena recomendación ya que solo uno de los ensayos quedó por debajo de esta curva.

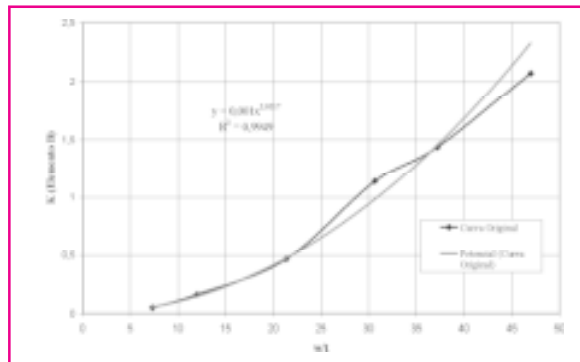
En cuanto a la falla local de pandeo de placa se pudo ver que al comparar los datos teóricos con los experimentales, se hizo necesario calcular un nuevo valor de  $K$ , dependiente de  $W/t$  del elemento estudiado y de la relación entre las fuerzas. Con base en estos resultados se plantean gráficas de  $W/t$  Vs  $K$  para los elementos A, B y C; las cuales se aproximaron a gráficas potenciales y lineales respectivamente.

En las Figuras 24, 25 y 26 se indican las gráficas  $W/t$  Vs  $K$  del elemento A, B y C, con sus

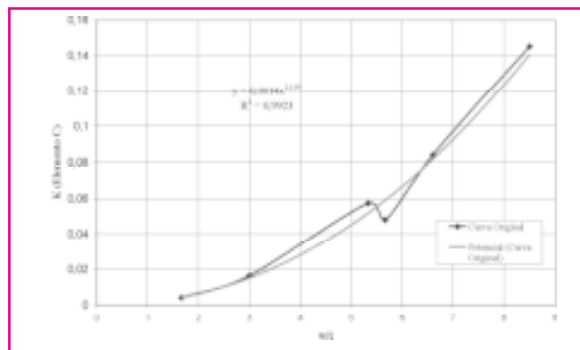
respectivas líneas de tendencia, que son de utilidad para calcular el valor real de  $K$ , logrando obtener unos resultados teóricos mucho más cercanos a la realidad.



**Figura 24.** Curva Original y de tendencia  $W/t$  Vs  $K$ . Elemento A



**Figura 25.** Curva Original y de tendencia  $W/t$  Vs  $K$ . Elemento B



**Figura 26.** Curva Original y de tendencia  $W/t$  Vs  $K$ . Elemento C

En términos generales las funciones que definen el valor de  $K$  en función de la relación  $W/t$ , se definen en la Tabla 4.

Tabla 4. Funciones de definición de W/t Vs K de los elementos A, B y C

Elemento	Ecuación
A	$K = 0,0708(w/t) - 0,9539$
B	$K = 0,001(w/t)^{2,0271}$
C	$K = 0,0009(w/t)^{2,139}$

## 8 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos a partir de esta investigación demuestran la validez de la formulación teórica.

Igualmente los resultados de los ensayos demuestran que los perfiles soportan cargas relativamente superiores a las calculadas teóricamente.

Los perfiles 1, 2, 3, 4, 5 y 6 presentan un tipo de falla global, algunos en el rango elástico y otros en el inelástico.

Las columnas 7, 8, 9, 10, 11 y 12 presentan fallas locales de pandeo de placa.

Algunos especímenes presentan cargas experimentales menores a las calculadas teóricamente, ocasionando este hecho una incertidumbre considerable en el cálculo de la carga resistente. Estas diferencias encontradas en algunos casos son menores al 15%.

Las dimensiones transversales y la magnitud de los esfuerzos residuales encontrados tienen una correlación consistente con el debilitamiento de los esfuerzos de las columnas.

El factor de seguridad de 0.85 empleado para el cálculo de la carga máxima resistente de este tipo de columnas ante cargas de compresión axial es una excelente aproximación de los datos obtenidos en forma experimental.

Para nuestra ingeniería Colombiana con este estudio se abre la ventana para seguir realizando este tipo de investigaciones que ayuden a

confirmar o a reformular la teoría que hasta este momento se ha venido utilizando en el cálculo de los esfuerzos resistentes de este tipo de perfiles.

## 9 REFERENCIAS

Acesco. Manual de diseño de perfiles estructurales en acero de lámina delgada. 2000. Tercera edición.

AIS, Asociación colombiana de ingeniería sísmica. NSR-98 "Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sísmo Resistente". 1998. Bogotá.

AISI "Método lineal para el cálculo de las propiedades geométricas de las secciones formadas". 1997.

Dat, D.T. "The Strength of cold-formed steel columns", thesis presented to Cornell University, at Ithaca, N.Y., in partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

De Buen López de Heredia, Oscar. Estructuras de Acero Comportamiento y Diseño. 1980. México. Editorial Limusa.

Gaylord, Edwin. Gaylord, Charles. Stallmeyer, James E. Design of Steel Structures. 1992. Tercera edición, Mac Graw Hill.

Marco García, Jaime. Curso Básico de Cálculo y Diseño de Estructuras Metálicas en Ordenador Adaptado al Eurocódigo 3 y al LRFD (AISC). 2000. España. Mc Graw Hill.

Merritt, Frederick S. Manual del Ingeniero Civil. 1992. México. Mc Graw Hill.

Mulligan, G.P., and Pekoz, T.B. "Locally buckled thin-walled columns". 1984. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 110(11), 2635-2654.

Wei-Wen Yu. "Cold-formed steel design". 2000. Tercera edición.

Weng, C.C., and Pekoz, T. "Compression test of cold-formed steel columns". 1990. *J. Struct. Engrg.*, ASCE.

Weng, C.C., and Pekoz, T. "Residual stresses in cold-formed steel members", 1989. *J. Struct. Engrg.*, ASCE.

Standard Welding Procedure Specification (WPS).

## 10 AGRADECIMIENTOS

Acesco "Acerías de Colombia" por el suministro de los perfiles metálicos para los ensayos. West-Arco por el suministro de la soldadura y por la conformación de los perfiles. CIMOC "Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles" por la colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y en la instrumentación de los especímenes.