

# Resistencia a tensión de perfiles omega de lámina delgada, formados en frío

Jairo Uribe Escamilla

Los perfiles hechos con lámina de acero plegada en frío se utilizan ampliamente en la construcción. El proceso de formado puede aumentar de manera notable su resistencia, por entrar el material en la zona de endurecimiento por deformación. Por otra parte, el hecho de que muchos de ellos posean una gran reserva de resistencia después de la aparición del pandeo local hace que su diseño presente diferencias importantes con el de los perfiles laminados. La gran variedad de posibles configuraciones impiden que una norma de diseño cubra todos los casos, por lo cual para aquellas situaciones que no se pueden calcular con las ecuaciones de la norma, ésta prescribe que su comportamiento ante cargas de servicio y últimas se determine experimentalmente.

En este artículo se presentan los resultados de la primera parte de una investigación realizada en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, sobre columnas tubulares hechas con dos tipos de perfiles omega formados en frío, de 2 mm de espesor, cosidos con remaches. Esta primera etapa se orientó a encontrar las propiedades del material virgen y verificar las predicciones de capacidad a tensión, teniendo en cuenta los efectos del formado en frío, hechas con base en las indicaciones de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, Ref. 1, que coinciden con las dadas en la *Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, estipuladas por el American Iron and Steel Institute (Aisi), en 1991, 1996 y 2001, Ref. 2 a 5.

Se confirmó la importancia de verificar el cumplimiento de las normas por parte de los proveedores del material virgen y la imposibilidad de lograr la resistencia calculada por las muy altas relaciones ancho plano/espesor de los perfiles estudiados que dificultan la repartición uniforme de las fuerzas a todo el miembro.

Ingeniero civil, M.Sc., Ph.D. Profesor titular y miembro del Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

## INTRODUCCIÓN

La construcción con perfiles de acero formados en frío constituye hoy en día el renglón de más rápido crecimiento en el campo de las construcciones de acero. Su versatilidad, posibilidad de uso múltiple, resistencia, durabilidad y economía la hacen excepcionalmente apropiada como complemento en la construcción de edificios altos y por sí sola como estructura en edificios de menor altura y en vivienda económica. En todos ellos se utiliza también cada vez más, como tablero colaborador, trabajando en acción compuesta con el concreto, en las losas de entrepiso.

Aunque estos perfiles se pueden formar manualmente mediante prensas, sólo pueden competir económicamente cuando la fabricación se hace mediante trenes de rodillos.

En la figura 1, tomada del libro de Yu, Ref. 6, se pueden apreciar las configuraciones más usuales obtenidas con dicho procedimiento.

En Colombia, desde hace algunos años, varias empresas han incurrido en este promisorio campo. Producen tableros metálicos para entrepisos, paneles para cerramientos y divisiones, láminas corrugadas, perfiles C con pestaña y vigas armadas. La calidad de sus productos es reconocida no sólo en el país sino también en países vecinos, a los cuales se exportan con éxito creciente.

## ANTECEDENTES

El diseño de miembros estructurales hechos con perfiles de lámina de acero plegada en frío está gobernado por el capítulo F.6 de las NSR-98, Ref. 1. Ante la imposibilidad de

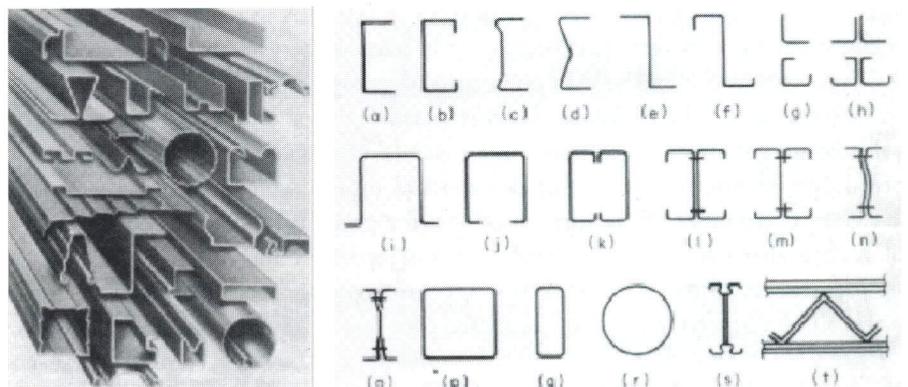
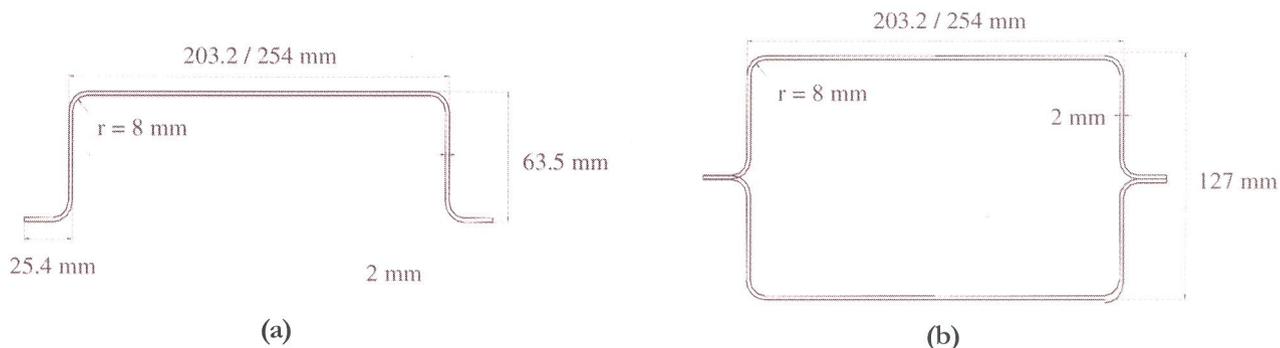


Figura 1. Perfiles más utilizados con fines estructurales (Yu, Ref. 6).



**Figura 2.** Perfiles omega utilizados en esta investigación: a) perfiles individuales; b) ensamble para miembros tubulares.

cubrir en las normas la enorme variedad de posibilidades que ofrece este tipo de estructuras, ella establece que para aquellos casos en que el cálculo de su capacidad de carga o de su deflexión no puede hacerse de acuerdo con lo estipulado en ella, se debe establecer su comportamiento estructural por medio de ensayos.

El Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (Gimeci) ha venido ofreciendo a las empresas del sector su colaboración para llevar a cabo proyectos de investigación que contribuyan a facilitar el diseño y fomentar el uso de las estructuras metálicas.

Teniendo en cuenta lo anterior, la empresa Corporación de Acero (Corpacero) acogió nuestro ofrecimiento y nos solicitó estudiar el comportamiento de perfiles omega, que quería utilizar para fabricar miembros tubulares cosidos con un procedimiento especial de remachado en frío.

## OBJETIVO

Los perfiles estudiados no pertenecen a ninguna de las líneas regulares de producción de la empresa y se elaboraron especialmente para esta investigación. En su fase inicial se decidió estudiar los dos perfiles mostrados en la figura 2, que difieren en el ancho de la parte superior: 203 mm en un caso y 254 mm en el otro, como se indica en la parte a) de dicha figura. Dichos perfiles tienen un solo eje de simetría. En la parte b) se puede observar el perfil tubular que resulta al unir dos perfiles omega iguales, por las pestañas. Se tendrá entonces una sección doblemente simétrica, lo cual ofrece considerables ventajas desde el punto de vista de su comportamiento estructural y, por tanto, será más eficiente.

Por haber sido fabricados con lámina de 2 mm de espesor, estos perfiles tienen elementos con una relación muy alta de ancho/espesor, característica que los

hace muy susceptibles al pandeo local y a la concentración de esfuerzos en las proximidades de las uniones.

En consecuencia, se consideró importante verificar experimentalmente el cumplimiento de las capacidades nominales previstas en las normas NSR-98, para estos miembros sometidos a tensión axial.

## PECULIARIDADES DEL DISEÑO CON PERFILES FORMADOS EN FRÍO

El diseño con perfiles formados en frío ofrece ciertas peculiaridades si se le compara con el de perfiles laminados. Entre ellas, cubiertas ampliamente en el libro de Yu, Ref. 6, se destacan las siguientes:

- El pandeo local y la resistencia posterior al pandeo de los elementos con un valor alto de la relación ancho/espesor.
- La rigidez ante la torsión.
- Las propiedades variables de las secciones con elementos sometidos a compresión.
- Las conexiones.
- El cálculo lineal de las propiedades de las secciones.
- El efecto del formado en frío.
- La autorización de determinar la capacidad portante mediante ensayos.

A continuación se explican las que tienen que ver con la resistencia a tensión de los perfiles, en especial los efectos del formado en frío.

### Rigidez ante la torsión

Muchos de los perfiles formados en frío tienen sección abierta y espesores por lo general muy pequeños: 2 a 6 mm. Por tanto, su rigidez a la torsión suele ser muy baja ya que es función del espesor de sus elementos elevado al cubo,  $t^3$ .

En el caso de canales con pestaña o sin ella, el centro de corte queda por fuera de la sección. Por tanto, si se utilizan como correas, inevitablemente se ven sometidos a torsión.

Tanto los canales con pestaña como los perfiles omega pueden fallar por pandeo torso-flector si se utilizan individualmente como columnas. Para evitarlo y por consiguiente lograr mayor eficiencia en el diseño, se acostumbra unir dos perfiles por sus pestañas o aletas, de manera que la sección resultante queda doblemente simétrica.

### Conexiones

Como el espesor de los elementos conectados suele ser mucho menor en los perfiles doblados en frío que en los laminados y además, el material de los primeros por lo general tiene una relación entre el esfuerzo a la rotura y el de fluencia mucho menor que la existente en los últimos, suele haber una gran diferencia de comportamiento en las uniones empernadas de unos y otros.

Por otra parte, la soldadura eléctrica de resistencia es muy utilizada en la construcción con perfiles formados en frío y rara vez lo es en la que emplea perfiles laminados. También es frecuente usar en la primera tornillos golosos.

Todo esto hace que las normas traigan prescripciones especiales para estos tipos de conexiones.

### Efecto del formado en frío

Las propiedades mecánicas del acero son afectadas por el trabajo en frío. Las normas del Aisi, Ref. 2, que sirvieron de base para las NSR-98, y 3 a 5, permiten utilizar, dentro de ciertos límites, el incremento en el esfuerzo de fluencia que resulta del proceso de formado. Dicho tema fue

objeto de la disertación doctoral del autor, Ref. 7 a 9.

### Determinación de la capacidad portante mediante ensayos

Teniendo en cuenta las muchas configuraciones poco usuales que pueden producirse con el formado en frío de las láminas de acero, es imposible que las normas incluyan métodos de diseño específicos para cada una de ellas. Además su cálculo puede ser muy difícil y complejo. Por eso las normas del Aisi y por ende las NSR-98 permiten que en tales casos su comportamiento estructural se determine mediante pruebas experimentales, hechas en el laboratorio del productor o en el de una entidad independiente.

Con base en esta facultad se planeó inicialmente el ensayo a tensión de probetas tomadas del material virgen antes del proceso de plegado y de los perfiles omegas, formados con dichas láminas, sometidos a tensión axial.

### PROGRAMA DE ENSAYOS

Teniendo en cuenta lo señalado en el numeral anterior se vio la necesidad de programar en la primera fase

de la investigación los siguientes ensayos:

- Ensayos a tensión del material virgen
- Ensayos a tensión de la sección completa
- Ensayos a compresión axial de columnas cortas
- Ensayos a compresión axial de columnas de longitud intermedia.

Estos ensayos y los de flexión constituyen la base para la evaluación de la capacidad portante de miembros sometidos a solicitaciones combinadas. Se espera que en futuras etapas se investiguen dichas solicitaciones.

En este artículo se presentan los resultados de los dos primeros ítems de la lista anterior.

### PROPIEDADES A TENSIÓN DEL MATERIAL VIRGEN

Las normas NSR-98, en su artículo F.6.6.3.3, prescriben que para determinar los valores representativos de fluencia y resistencia última del acero virgen con propósitos de aceptación y control, se deben ensayar a tensión por lo menos cuatro probetas de cada lote. Estas probetas deben tomarse longitudinalmente de

**Tabla 1**  
Resultados de los ensayos a tensión del material virgen

#### Primera muestra

Colada N° 102795 primer rollo (GPa)	Alargamiento en 50 mm (%)	Reducción de área (%)	Esfuerzos (MPa)		Módulo elástico
			Fluencia	Máximo	
Promedio general	35,3	73,7	257	350	198
Desviación estándar	1,2	3,7	11,4	17,1	6,1
Coefficiente de variación	3,4	5,0	4,4	4,9	3,1
Promedio del comienzo	36,3	76,0	260	351	195
Promedio del final	34,3	71,3	254	348	200

#### Segunda muestra

Colada N° 102795 segundo rollo	Alargamiento en 50 mm (%)	Alargamiento en 13,2 cm (%)	Reducción de área (%)	Esfuerzos (MPa)		Módulo elástico (GPa)
				Fluencia	Máximo	
Promedio	28	19,6	64,5	290	406	206

los puntos cuartos del ancho del rollo, cerca del extremo exterior del mismo.

Con propósitos de investigación es preferible tomar seis probetas distribuidas así: dos del comienzo, dos de la mitad y dos del final del rollo. Como esto implica tener que parar los trenes de laminación en la mitad del proceso, lo cual no deja de ser inconveniente, se aceptó como alternativa ensayar seis probetas tomadas así: tres del comienzo y tres del final del rollo, cortadas longitudinalmente de los puntos cuartos y mitad del ancho del rollo.

Las probetas se cortaron en Corpacero cumpliendo lo prescrito en la norma ASTM E8M-00: Método estándar de prueba de tensión de materiales metálicos, Ref. 10.

Todos los ensayos a tensión se hicieron en una máquina universal Shimadzu. Se dibujaron las curvas esfuerzo vs. deformación unitaria de todas las probetas y de ellas se obtuvieron los valores presentados en la tabla 1. Algunos perfiles se fabricaron con lámina de otra colada, por

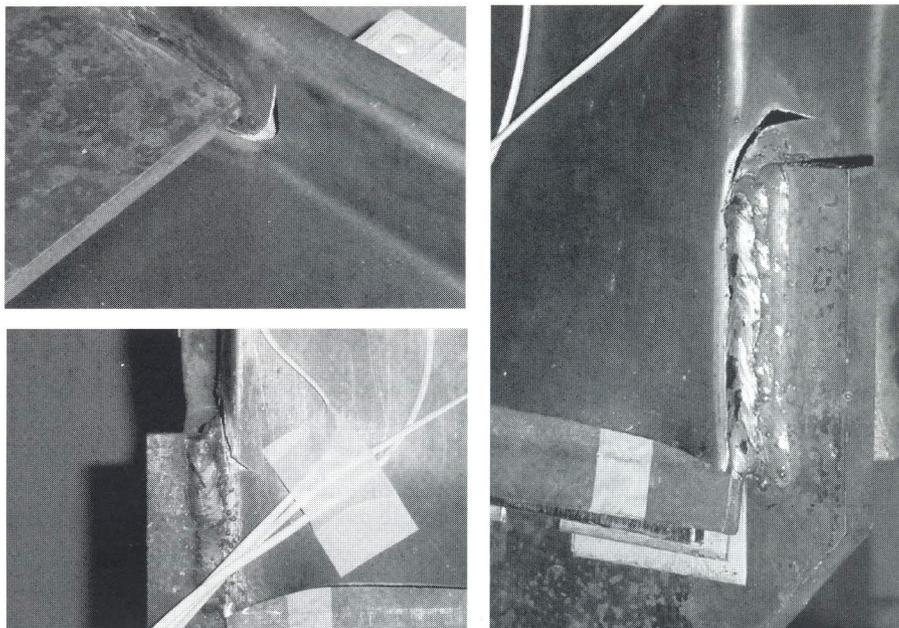


Figura 4. Falla por desgarramiento.

lo cual se hizo necesario tomar una segunda muestra.

### PROPIEDADES A TENSIÓN DE LA SECCIÓN FORMADA

Como se indicó anteriormente, el paso de la lámina por los rodillos del

tren de laminación cambia sus propiedades, especialmente en los dobles. El cambio en éstos lo estudió Karren, Ref. 11, y el que se produce en las porciones planas lo analizó el autor, Ref. 7 a 9.

Para estudiar experimentalmente el resultado de dicha acción en los perfiles objetos de la presente investigación, hubo que diseñar unas piezas que transmitieran la acción de las mordazas al plano centroidal del perfil, como se indica en la figura 3.

En el primer par de probetas, una de cada tipo: 203 mm y 254 mm, se utilizó un sistema similar al empleado con éxito en anteriores investigaciones. Sin embargo, en este caso se encontró que por el alto valor de la relación ancho/espesor del elemento principal, al aumentar la carga la porción central del elemento se acercaba a las platinas de agarre en forma apreciable con lo cual la carga dejaba de ser axial. Para evitarlo, en el curso del ensayo se colocaron unas platinas de relleno sostenidas con cinta de enmascarar.

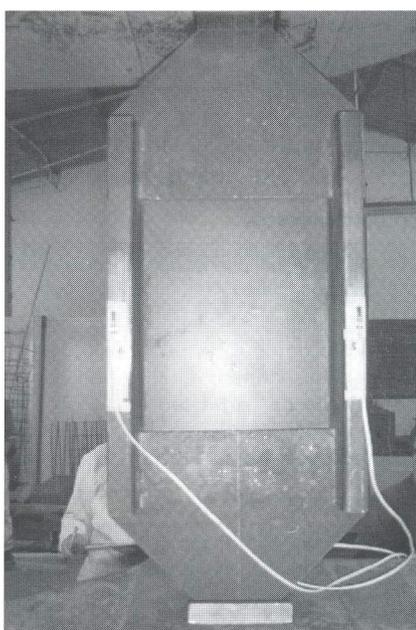
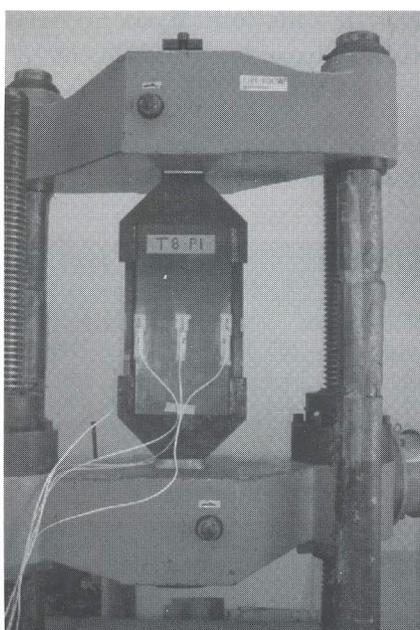
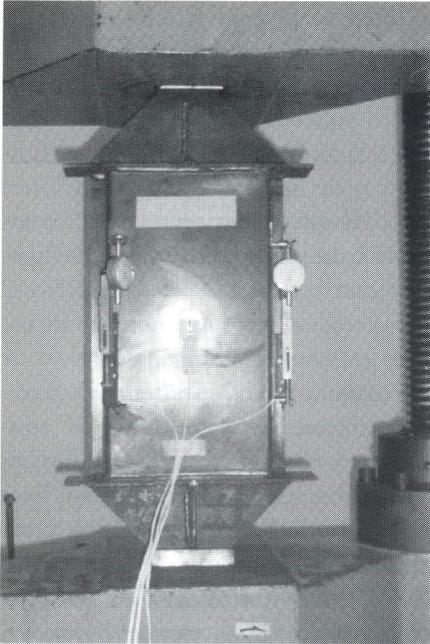


Figura 3. Ensayo a tensión de perfiles omega de 203 mm y 254 mm.

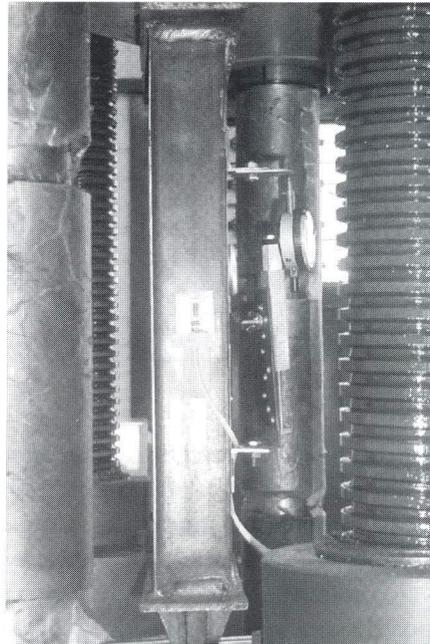


**Figura 5.** Esquema alternativo para la transmisión de la carga.

De cualquier manera, se hizo evidente que la distribución de la carga no era uniforme en todas las fibras de la sección y la falla por fluencia no se presentó en el tramo central sino que antes de que pudiera ocurrir se presentaron desgarramientos en las zonas de agarre, como se ve en la figura 4.

Ante este fenómeno y con miras a garantizar una distribución uniforme de la carga en toda la sección, se modificaron los mecanismos de agarre en la forma indicada en la figura 5.

La unión con soldadura de las probetas a las platinas que configuraban la T no era fácil de hacer por la gran diferencia entre el espesor de aquéllas y el de éstas. Quizás por esa razón los especímenes recibidos de Corpacero no se ajustaban a los planos suministrados por la Escuela y los elementos principales de transmisión de cargas no quedaron alineados con el plano centroidal del perfil. Por consiguiente, no se pudo aplicar axialmente la carga y las

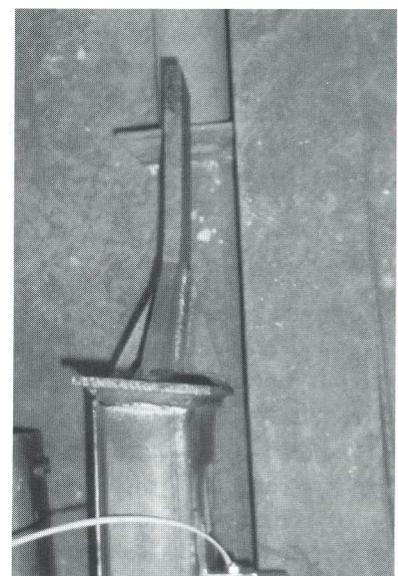
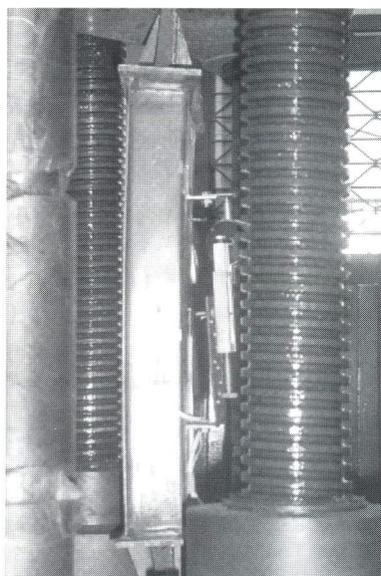


probetas quedaron sometidas a una combinación de tensión y flexión. Al quedar sometidas a una combinación de flexión y tensión el perfil se deformó, como se observa en

la figura 6, presentando pandeos locales que disminuyeron su capacidad.

La falla se produjo de nuevo prematuramente por desgarramiento cerca de los extremos de las probetas, confirmando la dificultad de lograr conexiones adecuadas.

En la tabla 2 se presentan los resultados de carga máxima,  $T_u$ , obtenidas en los ensayos a tensión de las seis probetas. Para cada tipo de perfil se evaluaron los siguientes promedios: a) el de las probetas P1 y P2 por provenir del mismo material virgen; b) el de las probetas P2 y P3 por tener el mismo mecanismo de agarre, ajustando este último proporcionalmente a la relación encontrada entre las resistencias de fluencia de las muestras 2 y 1; y c) el de todas las probetas con el mismo ajuste que se acaba de mencionar. Se escogió como base la resistencia de la muestra 1 por haber sido formadas con dicho material todas las columnas que se ensayaron a compresión.



**Figura 6.** Combinación de flexión y tensión por excentricidad de la platina de agarre.

**Tabla 2**  
Resistencia de perfiles a tensión

Probeta	Dimensiones (mm)				Área mm <sup>2</sup>	T <sub>u</sub>	
	Ancho	Altura	Aleta	Espesor		(Ton)	(kN)
T8 -P1	205,0	64,2	30,6	2,03	753	20,47	201
T8 -P2	214,7	68,5	29,9	2,04	791	25,12	246
T8 -P3	208,2	61,9	38,7	2,02	779	29,40	288
<b>T8 - Prom.</b>	<b>209,3</b>	<b>64,9</b>	<b>33,1</b>	<b>2,03</b>	<b>774</b>	<b>25,00</b>	<b>245</b>
T10 -P1	257,6	64,0	30,5	2,00	846	20,65	203
T10 -P2	259,7	70,5	28,7	2,06	894	29,15	286
T10 -P3	255,6	59,7	17,9	2,00	775	29,90	293
<b>T10 - Prom.</b>	<b>257,6</b>	<b>64,7</b>	<b>25,7</b>	<b>2,02</b>	<b>838</b>	<b>26,57</b>	<b>261</b>

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Material virgen

El material utilizado en la fabricación de estos perfiles corresponde a la especificación A570 Grado 33 de la American Society for Testing and Materials (ASTM), Ref. 12. En la tabla 3 se presentan las propiedades mecánicas establecidas en la norma citada para dicho material, junto con las obtenidas en los ensayos de las muestras 1 y 2, que se dieron en el numeral 7.

Como puede verse, ambas muestras cumplen el requisito de esfuerzo de fluencia mínimo, pero la muestra 1 no cumple los de resistencia última mínima; está por debajo en un 7,5%. La relación mínima entre esfuerzos de rotura y esfuerzos de fluencia tampoco la cumple ninguna de las dos muestras: la 1 está por debajo en 18% y la 2 en 12%. En cuanto al módulo de elasticidad E, los valores encontrados están 2,5% por debajo y 1,5% por encima del valor estipulado en las normas AISI-96, Ref. 3, respectivamente. Con respecto a las normas NSR-98, que establecen  $E = 200.000$  MPa, dichas cifras cambian a 1% por debajo y 3% por encima, en uno y otro casos.

De las deficiencias encontradas, realmente preocupa la de resistencia última mínima,  $F_{u \text{ min}}$ , de la muestra 1, ya que en miembros a tensión que fallen por fractura, se correría el ries-

go de que la carga última resistente fuese inferior a la calculada con base en las propiedades nominales. Como sólo se ensayaron seis probetas, el valor mínimo obtenido, que estaba por debajo del especificado, corresponde a un percentil del 16,7%, demasiado alto si se lo compara con el 5%, que usualmente se considera aceptable. Además, cuatro de las seis probetas no cumplieron con el mínimo, lo cual corresponde a un percentil del 66,7%, totalmente inaceptable.

### Generalidades del diseño para estados límites

El capítulo F.6 de las normas NSR-98, que regula el diseño de esta clase de miembros, sigue la filosofía de *diseño para estados límites* que esencialmente consiste en reducir la probabilidad de falla para ciertos estados límites considerados importantes a

valores aceptables, como lo explica el autor en la referencia 13.

Los estados límites se definen como aquellos más allá de los cuales la estructura deja de cumplir su función o de satisfacer las condiciones para las que se proyectó. Estos estados límites están íntimamente ligados con los estados de carga. En el proyecto es necesario considerar todos los estados límites posibles, de tal manera que se asegure un grado conveniente de seguridad y de aptitud para el servicio. El procedimiento usual consiste en diseñar con base en el estado límite más crítico y verificar luego que no se alcanzan los otros estados límites. Generalmente los estados límites pueden clasificarse en dos categorías:

- Estados límites últimos*, que corresponden al máximo de la capacidad portante.
- Estados límites de servicio*, que están ligados a los criterios que rigen la utilización normal y la durabilidad.

En sistemas estructurales con perfiles doblados en frío es frecuente que las condiciones de servicio y no la resistencia constituyan el factor determinante en el diseño.

### Criterio de diseño

El criterio de diseño para estados límites se puede expresar matemáticamente de varias formas. Una de

**Tabla 3**  
Análisis de las propiedades del material virgen

Referencia	F <sub>y</sub> mínimo (MPa)	F <sub>u</sub> mínimo (MPa)	F <sub>u</sub> /F <sub>y</sub> mínimo	Elongación mínima en 50 mm %	Módulo elástico (MPa)
A570 Gr 33	228*	359*	1,58*	18*	203000*
Muestra 1	241	332	1,30	34	198000
Muestra 2	287	402	1,39	28	206000

\* Valores estipulados en las Normas AISI-96.

ellas, que utiliza *coeficientes de carga y resistencia*, se puede expresar mediante la siguiente ecuación general, empleada en las normas NSR-98:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_k Q_k \quad (8.1)$$

en donde el lado izquierdo de la ecuación se refiere a la resistencia de la estructura y el lado derecho al efecto de las cargas que actúan sobre ella. El significado de los términos individuales es:

$\phi$  = coeficiente de reducción de capacidad, que tiene en cuenta las incertidumbres que se presentan en las propiedades de los materiales, en las dimensiones de los miembros o tolerancias de fabricación y en el modelo matemático utilizado para el cálculo, denominado también factor profesional.

$R_n$  = resistencia nominal del miembro calculado con base en los valores nominales de propiedades del material y dimensiones, utilizando una ecuación de las normas.

$\gamma_k$  = coeficiente de mayoración de la carga  $k$  (gravitacional, sísmica, eólica, presión, temperatura, etc.), que tiene en cuenta las incertidumbres en magnitud y localización de la misma, y

$Q_k$  = sollicitación causada por una carga  $k$ .

### Resistencia nominal y reducción de capacidad

La aleatoriedad de la resistencia verdadera,  $R$ , de un elemento estructural resulta de las variaciones inherentes a las propiedades mecánicas del material, a las tolerancias en las dimensiones con respecto a las nominales y a las incertidumbres en la teoría con que se evalúa matemáticamente su capacidad. En consecuencia, la parte izquierda de la ecuación (8.1) se puede expresar, generalmente, como el producto:

$$R = \phi R_n = f(M, F, P) R_n \quad (8.2)$$

en donde  $M$  representa la incertidumbre en propiedades de los materiales,  $F$  la incertidumbre en las tolerancias de fabricación y  $P$  las que encierran las fórmulas empleadas en el cálculo teórico, o coeficiente profesional.

Si se conoce la función  $R$ , es posible calcular el valor de  $\phi$ :

$$\phi = (R_m / R_n) e^{(-0.55 \beta V_R)} \quad (8.3)$$

en donde:

$R_m$  = resistencia promedio

$R_n$  = resistencia nominal de acuerdo con las expresiones dadas en el código

$V_R$  = coeficiente de variación de la resistencia

El número de ensayos en esta primera etapa de la investigación es muy pequeño para poder utilizar las fórmulas anteriores con un grado adecuado de confiabilidad. En consecuencia, se optó por calcular los valores de  $\phi$  con base en su significado original, o sea utilizando los resultados experimentales y los valores nominales; esto es:

$$\phi = R_{\text{experimental}} / R_{\text{nominal}} \quad (8.4)$$

### Resistencia a tensión

Tanto las normas NSR-98 como las Aisi-96 utilizan las siguientes expresiones para calcular la capacidad de diseño de miembros cargados a tensión:

$$\phi_t = 0.95 \quad (8.5)$$

$$T_n = A_n F_y \quad (8.6)$$

$\phi_t$  = coeficiente de resistencia para tensión.

$T_n$  = resistencia nominal del miembro cuando se carga a tensión.

$A_n$  = área neta de la sección transversal.

$F_y$  = esfuerzo de fluencia de diseño determinado conforme a F.6.1.5.2.1.

Es evidente que el estado límite considerado en este caso es el de fluencia. En la segunda columna de la tabla 4 se presentan los resultados de aplicar las ecuaciones (8.5) y (8.6) a los perfiles objeto de este estudio, utilizando valores nominales; en la tercera columna, en cambio, se usan las mismas fórmulas pero empleando los valores reales de dimensiones y propiedades del acero. La sexta columna presenta las cargas máximas obtenidas en los ensayos y la séptima la relación entre la carga última y la resistencia calculada con las normas.

Se puede observar que la relación entre la carga última y la resistencia nominal dada por las normas estuvo entre 1,23 y 1,77 para los perfiles de 203 mm (T8) y entre 1,09 y 1,58 para los perfiles de 254 mm (T10). Los promedios respectivos fueron 1,50 y 1,40.

En la última columna se presenta la relación entre la carga última experimental y la resistencia de diseño,  $\phi_t T_{ny}$ , según las normas. Los valores respectivos están entre 1,30 y 1,86, con promedio de 1,58, para los perfiles T8, y entre 1,15 y 1,66, con promedio de 1,48, para los perfiles T10. Estos valores son lógicos, pues como se explicó anteriormente, en los ensayos no fue posible obtener repartición uniforme de la carga en todas las fibras de la sección y las más próximas a los dobleces debieron fluir antes que las más alejadas; en el mismo

**Tabla 4**  
Comparación de resistencias a tensión: nominales y de diseño, con las obtenidas experimentalmente

Probeta	T <sub>ny</sub>	T <sub>ny exp</sub>	φ <sub>t</sub> T <sub>ny</sub> (kN)	φ <sub>t</sub> T <sub>ny exp</sub> (kN)	T <sub>u</sub>	T <sub>u</sub> /T <sub>ny</sub>	T <sub>u</sub> /T <sub>ny exp</sub>	T <sub>u</sub> /φ <sub>t</sub> T <sub>ny</sub>
T8 - P1	163	193		184	201	1,23	1,04	1,30
T8 - P2		203	155	193	246	1,51	1,21	1,59
T8 - P3		226		215	288	1,77	1,28	1,86
T10 - P1	186	218		207	203	1,09	0,93	1,15
T10 - P2		230	177	218	286	1,54	1,24	1,62
T10 - P3		225		213	293	1,58	1,31	1,66

orden debió ocurrir el proceso de endurecimiento por deformación hasta que se presentaron las fallas locales por fractura en las proximidades de los extremos. Si se consideran las relaciones promedio F<sub>u</sub> / F<sub>y</sub> de 1,30 y 1,39 obtenidas con las muestras 1 y 2, vemos que son inferiores a las relaciones de resistencia encontradas acá.

Por otra parte, se sabe que el trabajo en frío incrementa la resistencia a la fluencia del material virgen y que en ciertas condiciones las normas permiten utilizar dicho incremento. En efecto, las NSR-98 en su artículo F.6.1.5.2.2 señalan que el punto de fluencia del acero en miembros en tensión cargados axialmente debe determinarse mediante ensayos de ese tipo de la sección completa o calculándolo con las siguientes ecuaciones:

$$F_{ya} = CF_{yc} + (1 - C) F_{yf} \tag{8.7}$$

En donde:

F<sub>ya</sub> = punto de fluencia promedio del acero en las secciones completas de las aletas de miembros de flexión.

C = para miembros en tensión o en compresión, es la relación entre el área transversal total de los dobleces y el área transversal total de la sección completa.

F<sub>yf</sub> = punto de fluencia promedio ponderado de las porciones planas, establecido de acuerdo con F.6.6.3.2 o el punto de fluencia del material virgen si no se han efectuado ensayos.

F<sub>yc</sub> = B<sub>c</sub>F<sub>yv</sub>/(R/t)<sup>m</sup> punto de fluencia a tensión de los dobleces

Cuando:

F<sub>uv</sub>/F<sub>yv</sub> > 1,2, R/t ≤ 7 y el ángulo mínimo incluido ≤ 120°

$$B_c = 3,69 \left( \frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right) - 0,819 \left( \frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right)^2 - 1,79$$

$$m = 0,192 \left( \frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right) - 0,068$$

R = radio interno del doblez.

t = espesor de la lámina.

F<sub>yv</sub> = punto de fluencia a tensión del acero virgen especificado en las normas citadas en F.6.1.3.1 o establecido de acuerdo con F.6.6.3.3.

F<sub>uv</sub> = resistencia última a la tensión del acero virgen, especificado o establecido en la misma forma.

Aplicando esta ecuación a los valores nominales y a los valores promedios de las muestras 1 y 2 se obtienen los valores de la tabla 5.

**Tabla 5**  
Resistencias a tensión nominales y calculadas

	Perfiles T8	Perfiles T10
F <sub>y</sub> formado nominal	244 MPa	242 MPa
F <sub>y</sub> formado muestra 1	269 MPa	268 MPa
F <sub>y</sub> formado muestra 2	305 MPa	304 MPa

Con estos valores se volvieron a calcular las resistencias nominales y las de diseño y se compararon con los valores experimentales, obteniéndose los valores de la tabla 6. En ésta se observa que la relación entre la carga última y la resistencia nominal dada por las normas, considerando los efectos del formado en frío, varía entre 1,15 y 1,65 para los perfiles T8 y entre 1,03 y 1,49 para los T10. Los promedios son 1,40 y 1,32, respectivamente.

Si se relacionan ahora las cargas últimas con las de diseño según las normas, se obtienen los valores de la última columna, que varían entre 1,23 y 1,77 para los perfiles de 203 mm (T8) y entre 1,09 y 1,58 para los perfiles de 254 mm (T10). Los promedios respectivos son 1,50 y 1,40.

Por otra parte, si se considera el estado límite de fractura, las resistencias últimas nominales están dadas por:

$$T_{un} = A_g F_u \tag{8.8}$$

Evaluando dichos valores para las probetas T8 y T10 y comparándolos de nuevo con los resultados experimentales se puede calcular un coeficiente de reducción de capacidad referido a la fractura:

$$\phi_{tu} = T_u / T_{nu} \tag{8.9}$$

**Tabla 6**

Comparación de resistencias a tensión: nominales y de diseño, teniendo en cuenta el efecto del formado en frío, con las obtenidas experimentalmente

Perfil	$T_{nyf}$	$T_{nyf\ exp}$	$\phi_t T_{nyf}$ (kN)	$\phi_t T_{nyf\ exp}$ (kN)	$T_u$ (kN)	$T_u/T_{nyf}$	$T_u/T_{nyf\ exp}$	$T_u/\phi_t T_{nyf}$
T8 - P1		203		193	201	1,15	0,99	1,23
T8 - P2	175	213	163	203	246	1,41	1,16	1,51
T8 - P3		238		226	288	1,65	1,21	1,77
T10 - P1		227		218	203	1,03	0,89	1,09
T10 - P2	197	239	186	230	286	1,45	1,20	1,54
T10 - P3		236		225	293	1,49	1,24	1,58

Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 7.

Los coeficientes de resistencia están calculados en la quinta columna de dicha tabla y varían entre 0,78 y 1,12 para los perfiles T8, con un promedio de 0,95, y entre 0,69 y 1,00 para los perfiles T10, con valor promedio de 0,89. Si se utilizan los valores experimentales en vez de los nominales las relaciones varían entre 0,76 y 0,91, con promedio de 0,85, para los perfiles T8 y entre 0,68 y 0,93, con promedio de 0,84 para los T10. Si se comparan los primeros valores con el  $\phi_{tu} = 0,75$  prescrito en las normas para los perfiles laminados, se puede observar que lo exceden en promedio en 27% para los T8 y en 19% para los T10.

## CONCLUSIONES

El análisis de resultados conduce a las siguientes conclusiones:

### Procedimientos de ensayo y tolerancias de fabricación

- Los altos valores de la relación ancho/espesor de los perfiles ensayados dificultan la distribución uniforme de esfuerzos en todas las fibras de la sección transversal. Esto hizo que en las pruebas a tensión de la sección formada se presentaran fallas prematuras por desgarramiento

en la proximidad de las zonas de fijación, lo cual obligó a modificar los aditamentos de anclaje a las mordazas de la máquina de ensayos.

- Errores de fabricación en los nuevos especímenes no permitieron la aplicación axial de la carga, por lo cual quedaron sometidos a una combinación de tensión y flexión. En ellos la falla se produjo también por desgarramiento cerca de los extremos de las probetas.

### Propiedades mecánicas del material virgen

- Las dos muestras ensayadas cumplían los requisitos de resistencia mínima a la fluencia especificados por la American Society for Testing and Materials (ASTM) para aceros A570 grado 33.

- La muestra 1 estuvo un 7,5% por debajo de la resistencia última especificada en dicha norma, lo cual es preocupante si se trata del caso general para el material suministrado por el proveedor, pues aumentaría el riesgo de que la carga última resistente fuese inferior a la calculada con base en las propiedades nominales.

- Ninguna de las muestras cumplió los requisitos de relación mínima entre esfuerzos de rotura y esfuerzos de fluencia; la primera estuvo por debajo en 18% y la segunda lo estuvo en un 12%.

- Los valores encontrados para el módulo de elasticidad están entre 2,5% por debajo y 3% por encima de los valores estipulados en las normas NSR-98 y Aisi-1996. Estas diferencias no se consideran graves desde el punto de vista del diseño.

### Resistencia a tensión de los perfiles T8 y T10

- Las cargas últimas obtenidas experimentalmente en los ensayos a tensión de los perfiles nominales superaron entre 23 y 77% para los perfiles T8 y entre 9 y 58 para los perfiles T10, las resistencias nominales de resistencia a la fluencia calculadas con las normas. Los promedios respectivos fueron de 50 y 40%.

**Tabla 7**  
Coeficientes de reducción de capacidad a tensión, calculados con base en la resistencia a la fractura,  $\phi_{tu}$

Perfil	$T_{nu}$ (kN)	$T_{nu\ exp}$ (kN)	$T_u$ (kN)	$\phi_{tu} = T_u/T_{nu}$	$\phi_{tu\ exp} = T_u/T_{nu\ exp}$
T8 - P1		263	201	0,78	0,76
T8 - P2	257	277	246	0,96	0,89
T8 - P3		316	288	1,12	0,91
T10 - P1		296	203	0,69	0,68
T10 - P2	293	313	286	0,98	0,91
T10 - P3		315	293	1,00	0,93

- La misma comparación pero con respecto a la resistencia de diseño para el estado límite de fluencia,  $\phi_t T_{ny}$ , según las normas, muestra relaciones entre 1,30 y 1,86, con promedio de 1,58, para los perfiles T8 y entre 1,15 y 1,66, con promedio de 1,48, para los perfiles T10.

- Cuando se considera el efecto del formado en frío permitido por las normas, los valores anteriores se reducen a 1,23 y 1,77, con promedio de 1,50, para los perfiles T8, y 1,09 y 1,58, con promedio de 1,40, para los perfiles T10.

- Si se estipulara como criterio de diseño adicional el estado límite de fractura, los coeficientes de reducción de capacidad,  $\phi_{tu} = T_u / T_{un} = T_u / A_g F_u$ , varían entre 0,78 y 1,12, con un promedio de 0,95 para los perfiles T8, y entre 0,69 y 1,00, con valor promedio de 0,89, para los perfiles T10. Estos valores exceden ampliamente el  $\phi_{tu} = 0,75$  prescrito en las normas del American Institute of Steel Construction (Aisc), para perfiles laminados.

- En consecuencia, se considera seguro diseñar los miembros a tensión constituidos por los perfiles objeto de esta investigación, con las fórmulas pertinentes de las normas NSR-98.

## RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones anteriores se formulan las siguientes recomendaciones:

### Materia prima

- Los fabricantes deben exigirles a los proveedores de materia prima certificados de cumplimiento con las propiedades mecánicas estipuladas en las normas pertinentes de la American Society for Testing and Materials (ASTM), para cada una de las coladas del suministro.

- Adicionalmente conviene hacer comprobaciones aleatorias de dicho cumplimiento en laboratorios locales de reconocida autoridad.

### Resistencia a tensión axial

- A pesar de lo pequeño de la muestra, los resultados obtenidos demuestran que la resistencia a tensión axial de los perfiles omega estudiados se puede calcular con seguridad con las ecuaciones pertinentes de las normas NSR-98. Para garantizar que se pueda alcanzar dicha resistencia, es indispensable diseñar conexiones adecuadas que permitan una distribución uniforme de los esfuerzos en las proximidades de la unión. De esta manera se evitarán fallas prematuras por desgarramiento en dichos sitios.

## RECONOCIMIENTOS

El autor desea expresar sus agradecimientos a los ingenieros Roberto Pulido Gómez e Iván E. Ruiz Ortega, de Corpacero, y a Carlos Alberto Rodríguez Flórez y Sandra Rocío Jerez Barbosa, de la Escuela Colombiana de Ingeniería, por su invaluable ayuda en la ejecución de este proyecto.

En el trabajo experimental contó con la colaboración de los señores Édgar Aranda Romero, Jairo Páez Páez y José Ramón Torres Mejía, laboratoristas de la Escuela.

## REFERENCIAS

- Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998*, publicadas por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Bogotá, 1998.
- Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members*, American Iron and Steel Institute (Aisi), Washington, D. C., EE. UU., 1991.
- Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, American Iron and Steel Institute (Aisi), Washington, D. C., EE. UU., 1996.
- Cold-Formed Steel Design Manual*, American Iron and Steel Institute (Aisi), Washington, D. C., EE. UU., 1996.
- North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members: 2001 Edition*, American Iron and Steel Institute (Aisi), Washington, D. C., EE. UU., 2002.
- Yu, W., *Cold-Formed Steel Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, EE. UU., 2000.
- Uribe, J., *Aspects of the Effects of Cold-Forming on the Properties and Performance of Light-Gage-Steel Structural Members*, tesis presentada al profesorado de la Escuela de Postgrado de la Universidad de Cornell para optar al grado de *Doctor of Philosophy*, Ithaca, N.Y., EE. UU., 1969.
- Winter, G. y Uribe, J., *Effects of Cold-Work on Cold-Formed Steel Members*, en *Thin-Walled Steel Structures: Their Design and Use in Buildings*, K. C. Rockey y H. V. Hill, editores, Gordon and Breach Science Publishers, Reino Unido, 1968.
- Uribe, J. y Winter, G., *Cold Forming Effects in Thin-Walled Steel Members*, en *Effects of Cold Work in Cold-Formed Steel Structural Members*, Cornell Engineering Research Bulletin, N° 70-1, Cornell University, Ithaca, N.Y., EE. UU., 1970.
- E 8M-00 METRIC: Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials (Metric)*, Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02, American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, EE. UU., 2000.
- Karren, K. W., *Corner Properties of Cold-Formed Steel Shapes*, Journal of the Structural Division, V.93 (ST1), American Society of Civil Engineers, ASCE, febrero de 1977.
- ASTM Standards, A570: Hot-Rolled Carbon Steel Sheets and Strips of Structural Quality*, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, EE. UU., 2004.
- Uribe, J., *Análisis de estructuras*, 2ª Edición, 3ª Impresión, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería y Ecoe Ediciones, Bogotá, 2004