

Desarrollo de una herramienta para el diseño de elementos estructurales de acero laminado en frío basado en la norma AISI 2007 y por el método LRFD



Abstract

This project provides one tool for the design of cold formed steel elements. It is based on C channel and structural square tubes in Costa Rica's market.

The norm AISI 2007 was used because it is the most recent one when developing the research.

The Screen Design Aid and the Spreadsheet were prepared in Microsoft Excel because it is a useful tool for arising complex procedures and multiple equations appear when using cold formed structures. Tables and figures are obtained for target sections, where data regarding the moment of resistance, compression, shear and tension are shown. Also, a Spreadsheet that allows to introduce new profiles for immediate analysis is added.

The situations later mentioned are resolved; however, aspects like joint designs or the analysis of other kinds of failures like web crippling are not covered. In addition, it is used for the analysis of individual members and structures of the sort.

Taking as a base the review of the literature, it should be imperative to keep precautions with cold formed steel structures because they are classified as fragile, reason why people should exploit its use.

Keywords: cold formed section, buckling, structural tube, C section, effective width, effective properties, LRFD.

Resumen

El presente proyecto proporciona una herramienta para el diseño de elementos de acero laminado en frío. Se basa en perfiles tipo C y tubos estructurales cuadrados presentes en el mercado costarricense.

Se trabajó con la norma AISI 2007, la que es la más reciente al momento de realizar la investigación.

Las ayudas de diseño, y la hoja de cálculo se realizaron en Excel, ya que es una herramienta útil para el desarrollo de complicados procedimientos y numerosas ecuaciones que surgen al utilizar secciones de acero laminado en frío. Se tienen tablas y figuras para las secciones meta, donde se exponen datos de resistencia al momento, compresión, cortante y tensión. Además de una hoja de cálculo que permite introducir nuevos perfiles para su análisis inmediato.

Se logran resolver las situaciones mencionadas; sin embargo, en el proyecto no se cubren aspectos como el diseño de uniones o el análisis de otros tipos de fallas como el aplastamiento del alma. Además, se utiliza para el análisis de miembros individuales, y no de estructuras como tales.

Ahora bien, según la literatura consultada, se debe tener precauciones con el uso de secciones de acero laminado en frío, ya que son estructuras clasificadas como frágiles, por lo cual no se debe abusar de su utilización.

Palabras clave: perfil laminado en frío, pandeo, tubo estructural, perfil C, ancho efectivo, propiedades efectivas, LRFD.

Desarrollo de una herramienta para el diseño de elementos estructurales de acero laminado en frío basado en la norma AISI 2007 y por el método LRFD

GEINER ALONSO OVIEDO PANIAGUA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre de 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
INTRODUCCIÓN	3
METODOLOGÍA	5
MARCO TEÓRICO	6
RESULTADOS	29
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
APÉNDICES	36
ANEXOS	37
REFERENCIAS.....	43

Prefacio

Los perfiles laminados en frío son ampliamente usados en el sector de la construcción, sus usos varían desde estructuras para techos (ver figura 1), a sistemas de entrepisos, paredes, etc.

Las normas de diseño se actualizan periódicamente, por lo cual se hace necesario contar con información actualizada, basada en los últimos parámetros de diseño dados por los respectivos comités.



Figura 1. Estructura de techo compuesta de perfiles tipo C. Fotografía por el autor.

El objeto del proyecto es proveer a todo interesado en el diseño de estructuras acero laminado en frío, de una herramienta útil.

Los perfiles utilizados en el proyecto son tipo C y los tubos estructurales cuadrados.

Se agradece a Dios y a mi familia quienes han estado presentes todos estos años en el desarrollo de mi carrera y por ende, en el presente proyecto. También se extienden los agradecimientos al ingeniero Orlando Morales por las observaciones realizadas en el desarrollo de la hoja de cálculo

Especial agradecimiento al ingeniero y profesor Gustavo Rojas Moya por la ayuda y asistencia brindada durante todo el desarrollo del proyecto

Resumen ejecutivo

Con este trabajo, se desarrolló una herramienta para el diseño de elementos de acero laminado en frío, tomando como punto de partida los perfiles tipo C y tubos estructurales que se consiguen en el país, además de la norma AISI para este tipo de acero.

En el país, estos perfiles son ampliamente usados, debido a su capacidad de soportar estructuras livianas, a su fabricación masiva, facilidad de manejo, su poco peso, así como a la facilidad con que se consiguen en el mercado.

Se espera que la investigación dé a la Escuela de Ingeniería en Construcción una herramienta útil para el uso de estudiantes y profesores, en razón, de que el tema estudiado no es parte del currículo de la carrera. Además, trata de mejorar las prácticas de ingeniería con respecto al uso de este tipo de perfiles

En comparación con el acero laminado en caliente, los perfiles laminados en frío tienen un comportamiento diferente debido a que su relación ancho/espesor es mayor y el proceso de fabricación distinto.

Se propuso como objetivo de la investigación realizar una compilación de los aceros laminados en frío que se producen o se venden en el país (tipo C y tubo cuadrado); obtener gráficos y tablas de diseño para dichos perfiles basados en su resistencia a la flexión, tensión, cortante y compresión.

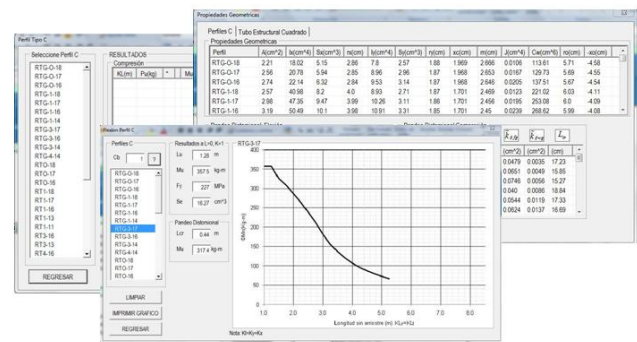
Siguiendo la normativa AISI del 2007 se preparó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se programaron las propiedades geométricas de los perfiles necesarias para el diseño; además de las propiedades efectivas de los perfiles C y tubos estructurales, tanto en flexión como en compresión.

De manera similar, programó en la hoja los miembros estructurales, para los cuales se incluyen los modos de fallas: pandeo lateral-torsional, flexo-torsional, distorsional; así como

las condiciones donde la perflería trabaja a toda su capacidad.

El trabajo produjo una hoja de cálculo, además las tablas y figuras con datos de flexión, compresión, cortante, tensión.

De la investigación bibliográfica se resalta que las estructuras de acero laminado en frío son frágiles, para lo cual se debe ser cuidadoso si se pretende usar estos materiales como parte de un sistema sismo-resistente.



Introducción

El uso de perfiles laminados en frío como elementos estructurales comenzó alrededor de 1850 en Estados Unidos e Inglaterra (Romanjek, 2001), para aplicaciones como sistemas de entrepisos, techos, sistemas de paneles. En nuestro país son notorios los perfiles tipo C y el tubo estructural.



Figura 2. Viga tipo cajón compuesta de perfiles C. Estructura ubicada en bodega industrial, falla evidente en el apoyo. Fotografía cortesía de: Alonso Poveda, 2010.

Se ha preferido el uso de estos perfiles debido a su capacidad de soportar estructuras livianas, a su fabricación masiva, facilidad de manejo, a su poco peso, así como a la facilidad con que se consiguen los comercios nacionales, lo que contrasta con los perfiles de acero laminado en caliente.

Su uso no siempre resulta en buenas prácticas de ingeniería (ver figura 2), con lo cual se hace necesario contribuir al buen manejo de este tipo de miembros de acero.

El diseño de estructuras en este tipo de elementos requiere consideraciones adicionales en comparación con los perfiles laminados en caliente, ya que se usan láminas de acero delgadas con relación a su ancho y además por el hecho de ser doblados en frío, lo cual altera las propiedades mecánicas del material (Romanjek, 2001).

Debe considerarse que existe un manual de diseño oficial, el S-1000 (*North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*) del AISI, cuya última publicación es de 2007. El Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR) hace referencia a las disposiciones del manual AISI.

La primera edición del manual de diseño fue desarrollado por la AISI (*American Iron and Steel Institute*) en 1946, con base en el trabajo de investigación de George Winter de la Universidad de Cornell entre 1939 y 1946 (Hancock et al, 2001). Desde entonces, el manual se ha actualizado periódicamente hasta su última edición.

El diseño de perfiles de acero laminado en frío resulta laborioso debido a que elementos del perfil (alma, patín o atiesador) pueden estar sometidos a la falla por pandeo local de compresión. Este pandeo se analiza por método del ancho efectivo que consiste en restar una porción del elemento en compresión, lo que genera nuevas propiedades para el perfil llamadas “efectivas”.

Existen modos de falla que afectan a los miembros estructurales (vigas, columnas): como el pandeo lateral, lateral-torsional, flexo-torsional, distorsional (en secciones abiertas tipo C), además de fallas a cortante, flexión, tensión y aplastamiento del alma.

Un estudio previo que cabe destacar es la tesis de la Universidad de Costa Rica: “*Propiedades Estructurales de Perfiles de Acero Laminados en Frío producidos en Costa Rica*” (Romanjek, 2001). En ella, el análisis presentado está enfocado a determinar mediante un extenso análisis las propiedades mecánicas y geométricas de la perfilería liviana, mediante pruebas de laboratorio y las compara con los resultados de la norma AISI.

El estudio es anterior a la norma vigente (2007), está enfocado únicamente a la perfilería tipo “C” producida por la empresa Metalco.

En Internet existe un software libre llamado CUFSM¹, desarrollado por la Universidad Johns Hopkins. Este software patrocinado por AISI, está orientado al análisis finito de miembros laminados en frío, lo cual lo convierte en una herramienta eficaz, pero de uso académico y requiere tiempo para resolver problemas muy específicos.

Debido a la ausencia de una herramienta de diseño, que facilite al profesional obtener valores de diseño para utilizar este tipo de perfiles como elementos estructurales, se propone el siguiente proyecto que consiste en crear una herramienta de diseño de acero laminado en frío por el método LRFD. En el proyecto se pretende:

- Realizar una compilación de las propiedades estructurales de perfiles de acero laminados en frío que se producen o se venden en el país, limitándose a los perfiles tipo C y los tubos estructurales cuadrados.
- Obtener gráficos y tablas de diseño para elementos de acero laminados en frío basado en el comportamiento de resistencia a la flexión, tensión, cortante y compresión.
- Realizar una aplicación donde se calcule y compile la información requerida.

¹ CUFSM es libre y está disponible en la dirección:
<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>

Metodología

En la ejecución del proyecto se realiza en primera instancia una recopilación de los perfiles laminados en frío que se producen en el país, tomando en cuenta todas las características geométricas (dimensiones de alas, almas, espesores) y características del acero (esfuerzo de fluencia). La información recopilada corresponde a los perfiles de Metalco, Tubotico (perteneciente a Metalco) y Aceros Roag.

Debido a la necesidad de comprender el comportamiento de la perfilería laminada en frío, se hace una investigación previa para este fin, la cual se presenta en el marco teórico.

Siguiendo la normativa AISI del 2007 se prepara una hoja de cálculo en Microsoft Excel con ayuda del programador de visual basic, se programan las **propiedades geométricas** de los perfiles necesarias para el diseño. Además se programan de **propiedades efectivas** de los perfiles C y tubos estructurales, tanto en flexión como en compresión.

También se procede de manera similar para los **miembros estructurales**, los cuales incluyen los modos de fallas: pandeo lateral-torsional, flexo-torsional, distorsional; así como las condiciones donde la perfilería trabaja a toda su capacidad.

Las secciones del AISI necesarias para el proyecto han sido traducidas del inglés al español. Además ha sido adaptada la sección de propiedades efectivas de manera que sea más simple de entender a los perfiles meta del proyecto (C y tubo estructural cuadrado), ya que el manual en su versión original lo hace de manera general para todo tipo de elementos.

La hoja de cálculo fue preparada para el usuario de la siguiente forma:

- Para perfiles C: dos formularios; uno presenta un grafico de momento último contra KL (longitud efectiva no arriostrada) del perfil seleccionado por el usuario. El segundo formulario presenta un cuadro para los datos de carga última y momento último de 0 a 8 metros,

además de la resistencia al cortante y a la tensión.

- Para tubos cuadrados: debido a la estabilidad que poseen al pandeo lateral, solo se presenta un formulario donde se presenta la resistencia al momento, cortante y tensión. Para la carga axial se presenta un cuadro donde se varía KL de 0 a 8m (8m se escoge de forma arbitraria por el autor).
- Dos formularios adicionales: uno para el manejo de los perfiles presentes en la hoja de cálculo; otro donde se presentan las propiedades geométricas de cada perfil (área, momentos de inercia, radios de giro, etc.).

Cabe mencionar que la resistencia de falla al pandeo distorsional tanto en compresión, como en flexión, se presenta en tablas de manera separada, similar a las de manual AISI.

Además de la hoja de cálculo, se prepararon gráficos y tablas de resistencia con la información de las secciones recopiladas.

Las secciones presentadas a continuación, están basadas en el manual AISI 2007. En la figura 3 se presentan algunas definiciones utilizadas para los elementos de los perfiles.

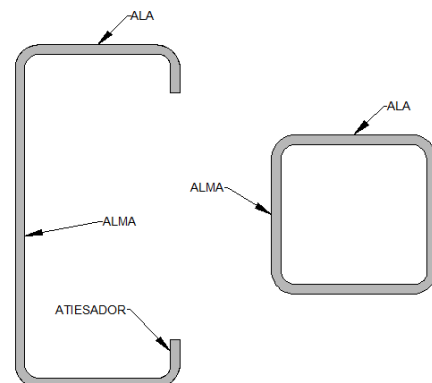


Figura 3. Elementos del perfil C (izquierda) y tubo estructural cuadrado (derecha). AutoCAD.

Marco Teórico

Placas

Teoría General

La teoría de placas y las investigaciones de laboratorio fundamentan el estudio de los perfiles laminados en frío, en el presente apartado se presenta parte de la teoría desarrollada para el estudio de placas.

El comportamiento de los perfiles laminados en frío viene gobernado por los pandeos locales de los elementos que constituyen el perfil (alma, atiesadores o alas). El esfuerzo crítico teórico para el pandeo de placas fue estudiado por Timoshenko.

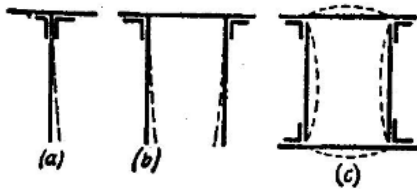


Fig. 138

Figura 4. Comportamiento de diferentes perfiles al pandeo. Tomado de: Timoshenko, S.

Tomando algunas formas de perfiles usualmente utilizadas en la industria del acero (cajón, T, doble T) ver figura 4, se denota que la longitud de la placa comprimida es grande comparada con su espesor y dimensiones. En el caso del perfil tipo cajón cada uno de sus lados puede tomarse como simplemente apoyado y cada cara tenderá a pandear de igual forma, en los casos de las figuras a y b los bordes inferiores estarán libres y los superiores empotrados elásticamente (Timoshenko, 1967).

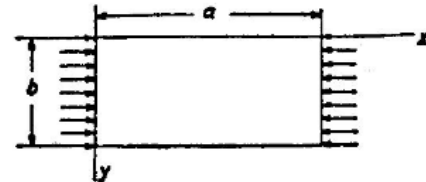


Fig. 139

Figura 5. Pandeo de placa rectangular. Tomado de: Timoshenko, S.

La solución al problema de una placa rectangular apoyada en los cuatro lados viene dado por la siguiente ecuación (ver figura 5):

$$\sigma_{cr} = \beta \frac{\pi^2 E h^2}{12 b^2 (1 - \mu^2)}$$

Donde:

σ_{cr} = valor crítico del pandeo de placa.

E = módulo de elasticidad del acero

μ = módulo de Poisson, igual a 0.3 para el acero

b = ancho de la parte plana en compresión

h = espesor del elemento comprimido

$$\beta = \left(\frac{a}{mb} + \frac{mb}{a} \right)^2$$

Representa un coeficiente que depende de la relación a/b

m = número entero de ondas en que divide la placa al pandear

El valor "m" se escoge de modo que β sea mínimo, este valor converge a 4, para el caso en estudio.

La equivalencia de la formula anterior para el análisis según el manual de diseño de AISI, utiliza la siguiente ecuación:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

Donde:

k = coeficiente de pandeo de placa, ver figura 6

w = ancho de la parte plana en compresión

t = espesor del elemento comprimido

Table C-B2-1
Values of Plate Buckling Coefficients

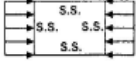
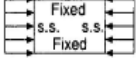
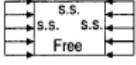
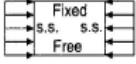
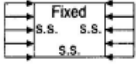
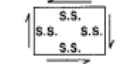

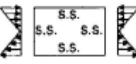

Case	Boundary condition	Type of stress	Value of k for long plate
(a)		Compression	4.0
(b)		Compression	6.97
(c)		Compression	0.425
(d)		Compression	1.277
(e)		Compression	5.42
(f)		Shear	5.34
(g)		Shear	8.98
(h)		Bending	23.9
(i)		Bending	41.8

Figura 6. Valores típicos de k para diferentes condiciones de apoyo y esfuerzos en placas. Tomado de: AISI Commentary.

Ancho Efectivo

Principalmente debido al fenómeno de pandeo en elementos no atiesados, se da una redistribución de esfuerzos con lo cual se hace difícil predecir su comportamiento, esto requiere un análisis por computadora. Entonces para simplificar el trabajo *Karman* sugirió el uso del ancho efectivo.

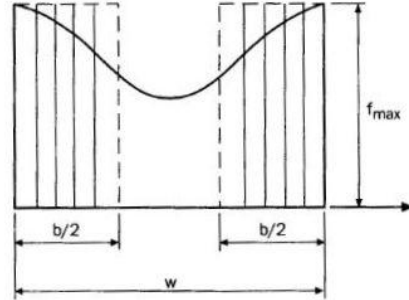


Figure C-B2-3 Stress Distribution in Stiffened Compression Elements

Figura 7. Distribución de esfuerzos en una placa atiesada. Tomado de: AISI Commentary.

Considerando la figura 7, los esfuerzos de compresión en la placa poseen una distribución no uniforme. El ancho seleccionado " b " es la suma de dos partes iguales ($b/2$). Estas partes rectangulares equivalen al esfuerzo total de la placa, cada una sujeta a un esfuerzo uniforme como se muestra en la figura, tal que f_{max} es igual a la carga real de la placa (Hancock et al, 2001).

Pandeo de perfiles

Pandeo local:

Tanto las secciones abiertas (tipo C) como cerradas (tubo estructural) están sujetas al pandeo local de sus elementos, lo que hace necesario aplicar el método del ancho efectivo para su análisis. Este tipo de pandeo es crítico cuando el miembro estructural totalmente arriostrado o a distancias no arriostradas muy cortas (Hancock et al, 2001).

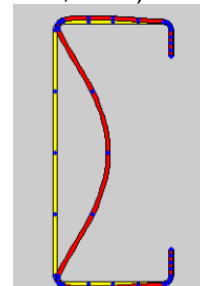


Figura 8. Pandeo local del alma de un perfil tipo C, sometido a compresión. Imagen tomada del programa CUFSM.



Figura 9. Pandeo local del alma, ala y atiesador de un perfil tipo C, sometido a flexión. Imagen tomada del programa CUFSM.

Pandeo lateral-torsional, flexo-torsional (fallas generales):

En flexión se da el pandeo lateral-torsional el cual es un giro lateral del ala a compresión junto con la sección del alma a compresión. Esto ocurre cuando se tiene un miembro no arriostrado lateralmente. Sin embargo, el pandeo lateral torsional no ocurrirá si la longitud no arriostrada es menor a L_U .

En compresión el pandeo flexo-torsional similar al de flexión, puede generar un giro de la sección a una carga y a una longitud no arriostrada definida.

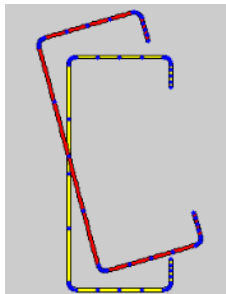


Figura 10. Pandeo flexo-torsional de un perfil tipo C, sometido a carga axial. Imagen tomada del programa CUFSM.

Pandeo distorsional (falla general)

Este tipo de pandeo es una inestabilidad que puede ocurrir en secciones tipo C. Está caracterizado por una inestabilidad del ala, el ala junto con el atiesador gira alrededor de la unión del ala de compresión y el alma (AISI Commentary, 2007).

Cabe destacar que si el miembro está arriostrado al pandeo lateral-torsional o flexo-torsional, no necesariamente lo estará para el distorsional, para lo cual se debe asegurar que el ala o las alas en compresión estén atiesadas.

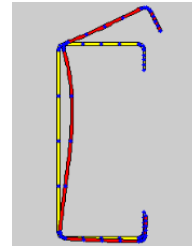


Figura 11. Pandeo distorsional de un perfil tipo C, sometido a flexión pura. Imagen tomada del programa CUFSM.

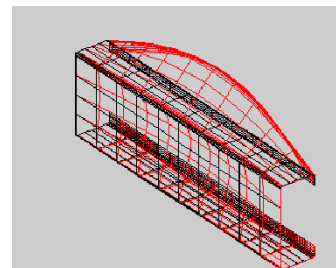


Figura 12. Pandeo distorsional de un perfil tipo C, sometido a flexión pura, modelo en 3D. Imagen tomada del programa CUFSM.

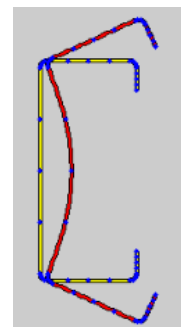


Figura 13. Pandeo distorsional de un perfil tipo C, sometido a compresión. Imagen tomada del programa CUFSM.

Pandeo lateral-torsional, para secciones cerradas (tubo estructural)

“Para condiciones de diseño típicas, debido a la elevada rigidez torsional de las secciones de caja cerrada (tubo estructural) el pandeo lateral-torsional no es crítico” (AISI Commentary, 2007).

Sin embargo el pandeo lateral torsional en secciones cerradas dominará el diseño si la longitud no arriostrada es mayor a L_u .

Perfiles en Costa Rica

En nuestro país existen empresas dedicadas a la producción de perfiles laminados en frío, Metalco como productor de perfilera tipo “C” y tubería estructural. Anteriormente existía Tubotico como productor de tubo estructural, sin embargo debido a una fusión empresarial, actualmente pertenece a Metalco².

También existen en el país otros distribuidores de aceros que importan tubo estructural.

Proceso de fabricación

Los aceros utilizados en la producción de estos perfiles, son importados en bobinas para la manufactura de la perfilera.

El proceso de fabricación de estos perfiles laminados en frío se hace mediante el siguiente proceso (Carranza, 2010):

La materia prima es acero en laminado y arrollado en bobinas con un espesor definido; estas bobinas se desenrollan y se hacen pasar por un sistema que limpia el acero de impurezas. Luego opcionalmente, se bañan en zinc fundido para darle galvanizado al material. Teniendo el material preparado se corta longitudinalmente según el tipo de perfil por laminar.

Las láminas cortadas se hacen pasar por un sistema de rodillos con un diámetro definido, donde se dobla el acero según la terminación deseada. Cabe destacar que este proceso se realiza totalmente en frío.

Para tubos estructurales, los rodillos laminan una forma circular a la que se le hace pasar una soldadura continua para cerrar el perfil, luego otro grupo de rodillos, le da la forma cuadrada o rectangular al perfil.

Dado que el proceso de fabricación es continuo, al final existe una máquina que corta los perfiles a la longitud programada (para mercado nacional 6 metros).

² Historia de Metalco.
<http://www.metalco.net/section.aspx?tipo=historia&len=es>

Efectos de la fabricación

Como efectos del proceso de laminado el material se endurece, se producen esfuerzos residuales e imperfecciones geométricas, por ende, las fórmulas teóricas para anchos efectivos se “modifican” tomando en cuenta la reducción en resistencia debido a estos efectos (Hancock et al, 2001).

“Los cambios en las propiedades mecánicas dependen de la forma final que se le da al perfil, y del proceso de laminado. En una sección puede haber partes planas sobre las cuales, supuestamente, no se realizó ningún trabajo en frío y las esquinas donde se dobló la lámina produciéndole deformación permanente” (Romanjek, 2001).

En las esquinas del perfil es donde se da el mayor daño del material. En el proceso de laminado las fibras del material de la cara interior se aplastan y las de la cara exterior se extienden. Las tensiones y compresiones generadas en la cara interior y exterior producen deformaciones longitudinales y transversales permanentes (Appold et al, 1985).

Las partes planas del material debido al proceso que este recibe, también resulta ser dañado; este puede ser doblado en una dirección y después en otra en el laminado, como ocurre en los perfiles “cuadrados”, donde antes de adquirir partes planas, se presentaba una forma circular.

Todas estas deformaciones del material provocarán endurecimiento y bajará la ductilidad (Romanjek, 2001; Vinnakota, 2006).

Diseño por LRFD

En este estudio se utiliza el método de carga y resistencia conocido como LRFD (*Load and Resistance Factor Design*). “Donde la resistencia de diseño de cada componente estructural debe ser igual o mayor a la resistencia requerida” (Vinnakota, 2006). Esto es:

$$R_u \leq \phi R_n$$

Donde:

R_u =Resistencia requerida

ϕ =Factor de reducción de resistencia

R_n =Resistencia nominal

Para el cálculo de la resistencia requerida debido a las cargas, estas deben estar factorizadas según las combinaciones de carga del Código Sísmico de Costa Rica.

Especificaciones: Código Sísmico de Costa Rica

Según el CSCR en la sección 10.3 de las estructuras de acero laminado en frío, cabe señalar las siguientes notas:

La ductilidad global asignada (μ) debe ser 1. Es la menor que se le puede asignar a una estructura. Esto lo clasifica como estructura frágil (artículo 4.4.1), por lo cual se deberá incrementar la carga sísmica por el factor de sobre-resistencia SR.

Otro punto importante es que los elementos estructurales de espesor de lámina t inferior a 2.4mm, no deben ser considerados parte del sistema sismo-resistente.

Propiedades geométricas

Sección tipo "C"

En términos generales, para el desarrollo de la aplicación se pretende que el usuario introduzca los datos incluidos en la figura.

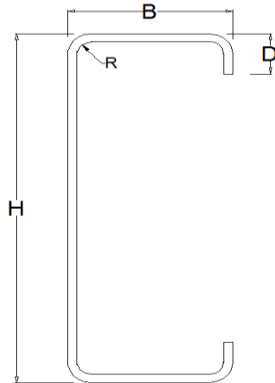


Figura 14. Sección de perfil C. AutoCAD.

Según la sección B2.3 (b) del AISI, tenemos las siguientes equivalencias, para la figura 14.

$$b_0 = B$$

$$h_0 = H$$

$$d_0 = D$$

Para el perfil tipo C, se definen las siguientes propiedades:

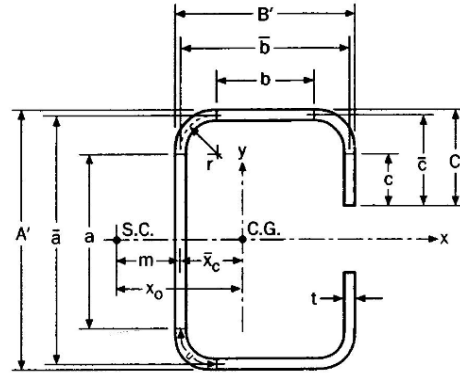


Figure 3.3.2-1

C-Section (Singly Symmetric) With Lips

Figura 15. Sección de un perfil tipo c (C.G: centro de gravedad, S.C: centro de cortante). Tomado de AISI, Manual.

Parámetros básicos

$$r = R + t / 2$$

$$a = A' - (2r + t)$$

$$\bar{a} = A' - t$$

$$b = B' - \left[r + \frac{t}{2} + \alpha \left(r + \frac{t}{2} \right) \right]$$

$$\bar{b} = B' - \left(\frac{t}{2} + \frac{\alpha t}{2} \right)$$

$$c = \alpha \left[C' - (r + t / 2) \right]$$

$$\bar{c} = \alpha \left(C' + \frac{t}{2} \right)$$

$$u = \frac{\pi r}{2} = 1.57r$$

$\alpha = 1$, para perfiles con atiesador (perfil C).

Área de sección

$$A = t \left[a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u) \right]$$

Momentos de inercia alrededor del eje "x".

$$I_x = 2t \left\{ \begin{array}{l} 0.0417a^3 + b \left(\frac{a}{2} + r \right)^2 + u \left(\frac{a}{2} + 0.637r \right)^2 \\ + 0.149r^3 + \alpha \left[0.0833c^3 + \frac{c}{4}(a+c+4r)^2 + u \left(\frac{a}{2} + 1.363r \right)^2 + 0.149r^3 \right] \end{array} \right\}$$

Distancia del centroide a la línea central del alma

$$\bar{x}_c = \frac{2t}{A} \left\{ \begin{array}{l} b \left(\frac{b}{2} + r \right) + u(0.363r) + \\ \alpha [u(b+1.637r) + c(b+2r)] \end{array} \right\}$$

Distancia del centroide a la línea exterior del alma.

$$\bar{x} = \bar{x}_c + \frac{t}{2}$$

Momento de inercia alrededor del eje "y".

$$I_y = 2t \left\{ \begin{array}{l} b \left(\frac{b}{2} + r \right)^2 + \frac{b^3}{12} + 0.356r^3 + \\ \alpha \left[c(b+2r)^2 + u(b+1.637r)^2 + 0.149r^3 \right] \end{array} \right\} - A\bar{x}_c^2$$

Radio de giro de los ejes principales

$$r_x = \sqrt{I_x / A}$$

$$r_y = \sqrt{I_y / A}$$

Distancia entre el centro de cortante y el centro del alma

$$m = \bar{b} \left[\frac{3\bar{a}\bar{b} + \alpha c(6\bar{a}^2 - 8c^2)}{\bar{a}^3 + 6\bar{a}\bar{b} + \alpha c(6\bar{a}^2 - 12ac + 8c^2)} \right]$$

Distancia entre el centroide y el centro de cortante

$$x_o = -(\bar{x}_c + m)$$

Constante de torsión de St. Venant

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u)]$$

Constante de alabeo

$$C_w = \frac{\bar{a}\bar{b}^2 t}{12} \left\{ \begin{array}{l} 2\bar{a}\bar{b} + 3\bar{a}\bar{b}^2 + \\ \alpha \left[48\bar{c}^4 + 112\bar{b}\bar{c}^3 + 8\bar{a}\bar{c}^3 + 48\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 \right] \\ + 12\bar{a}\bar{c}^2 + 12\bar{a}\bar{b}\bar{c} + 6\bar{a}\bar{c} \end{array} \right\} \frac{1}{6\bar{a}\bar{b} + (\bar{a} + \alpha 2\bar{c})^3 - \alpha 24\bar{a}\bar{c}^2}$$

Propiedades para el análisis de pandeo distorsional en perfil tipo C.

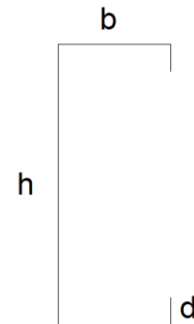


Figura 16. Propiedades geométricas para el ala, aplicables al pandeo distorsional. AutoCAD.

$$h = h_o - t$$

$$b = b_o - t$$

$$d = d_o - 0.5t$$

$$A_f = (b + d)t$$

$$J_f = \frac{1}{3}bt^3 + \frac{1}{3}dt^3$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2b^2 + 4bd^3 + t^2bd + d^4)}{12(b + d)}$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3)}{12(b+d)}$$

$$I_{xyf} = \frac{tb^2d^2}{4(b+d)}$$

$$C_{wf} = 0$$

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)}$$

$$h_x = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b+d)}$$

$$h_y = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)}$$

Sección tipo tubo cuadrado

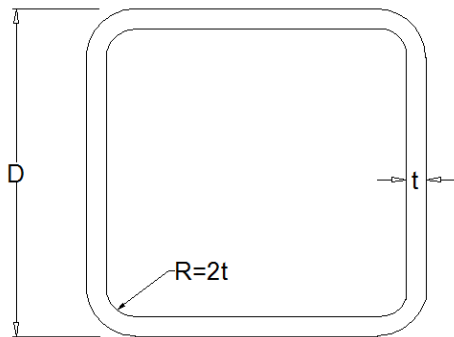


Figura 17. Sección de un perfil cuadrado. AutoCAD.

Según la sección B2.3 (b) del AISI, tenemos las siguientes equivalencias, según la figura 17.

$$h_0 = D$$

Parámetros básicos

$$r = R + t / 2$$

$$l = 1.57r$$

$$c = 0.637r$$

$$w = D - 2(R + t)$$

$$a = D - t$$

Área de la sección

$$A = 4t(w + l)$$

Módulo de sección alrededor del eje "x", de la sección sin reducir.

$$S_f = \frac{I_x}{D/2}$$

Momento de inercia alrededor de los ejes principales

$$I_y = I_x = t \left\{ \begin{array}{l} 2 \left[\frac{w^3}{12} + w \left(\frac{D-t}{2} \right)^2 \right] + \\ 4 \left[l \left(\frac{w}{2} + c \right)^2 \right] \end{array} \right\}$$

Radio de giro de los ejes principales.

$$r_y = r_x = \sqrt{I_x / A}$$

Constante de torsión de St. Venant.

$$J = \frac{(a)^4}{(a/t)}$$

Constante de alabeo.

$$C_w = 1$$

Propiedades efectivas

Límites dimensionales

La sección B1.1 del AISI regula las dimensiones de los elementos, para que norma sea aplicable, según las siguientes restricciones:

- Elementos a compresión atiesados con un borde conectado a un alma y el otro a un atiesador (aplicable a alas de perfiles C) = $w / t \leq 60$
- Elementos a compresión atiesados con ambos bordes conectados a otros elementos atiesados (aplicable a almas de perfiles C y también a almas y alas de tubos estructurales) = $w / t \leq 500$
- Elementos a compresión no atiesados (aplicable a atiesadores) = $w / t \leq 60$

Elementos estructurales tipo “C”, flexión en el eje “x”

Para encontrar las propiedades efectivas del perfil C en flexión, podría ser necesario reducir diferentes elementos que componen el perfil. Estos elementos son el ala, el alma de compresión y el atiesador a compresión.

En la figura 18 se observan varios elementos a los cuales se les resta anchos no efectivos, los cuales están marcados de negro.

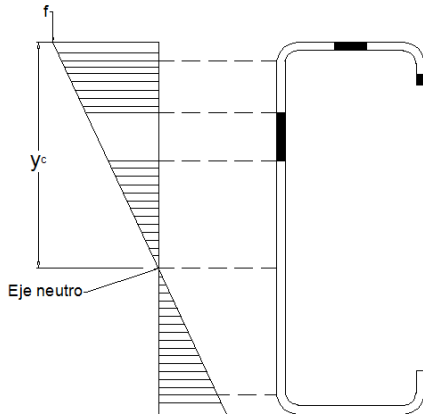


Figura 18. Secciones por reducir en un perfil tipo C sometido a flexión. AutoCAD.

Ala en compresión con atiesador

Este tipo de elemento tendrá en flexión por el eje “x” estará sometido a compresión uniforme en todo su ancho. El ancho efectivo será determinado en la obtención del k de la sección B4 del AISI, y su ancho efectivo según la sección B2.1.

Para la determinación de w según la siguiente figura, se plantea:

$$w = b = B - 2(R + t)$$

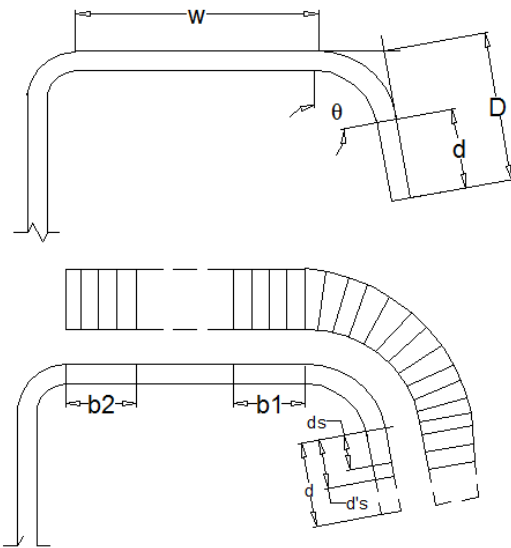


Figura 19. Elementos del ala y esfuerzos en el Ala. AutoCAD.

Para la determinación de k, se presentan los siguientes dos casos:

Caso 1:

Para $w / t \leq 0.328S$:

$$I_a = 0$$

$b = w$, ala completamente efectiva

$$b_1 = b_2 = w / 2$$

$$d_s = d'_s$$

Caso 2.

Para $w / t > 0.328S$

$$b_1 = (b / 2)(R_1)$$

$$b_2 = b - b_1$$

$$d_s = d'_s (R_1)$$

Donde:

$$S = 1.28\sqrt{E/f}$$

E=módulo de elasticidad del acero

f=esfuerzo de compresión al que está sometido el elemento (puede ser igual a F_y ó a F_c como se define en el apartado de miembros estructurales).

b_1 =ancho efectivo, definido en la figura 19.

b_2 = ancho efectivo, definido en la figura 19.

I_a =momento de inercia del labio adecuado para que el ala sea rigidizada.

$$I_a = 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3$$

$$\leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right]$$

$$(R_1) = I_s / I_a \leq 1$$

I_s =momento de inercia de la sección total del rigidizador alrededor de propio eje centroidal paralelo al ala.

$$I_s = (d^3 \sin^2 \theta) / 12$$

θ =ángulo definido en la figura 19, igual a 90 grados para perfiles tipo "C"

En el **caso 2**, para la determinación del factor k :

CUADRO 1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PLACA k	
$D/w \leq 0.25$	$0.25 < D/w \leq 0.8$
$k = 3.57(R_1)^n + 0.43 \leq 4$	$k = \left(4.82 - \frac{5D}{w} \right) (R_1)^n + 0.43 \leq 4$

Office Word

Donde:

k =coeficiente de pandeo de placa.

$$n = \left(0.582 - \frac{w/t}{4S} \right) \geq \frac{1}{3}$$

Con el factor k , entonces:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

$b = w$, cuando $\lambda \leq 0.673$ (no se da pandeo)

$b = \rho w$, cuando $\lambda > 0.673$.

Donde:

w =ancho del ala

F_{cr} =esfuerzo de pandeo de placa

λ =factor de delgadez

ρ =factor de reducción local

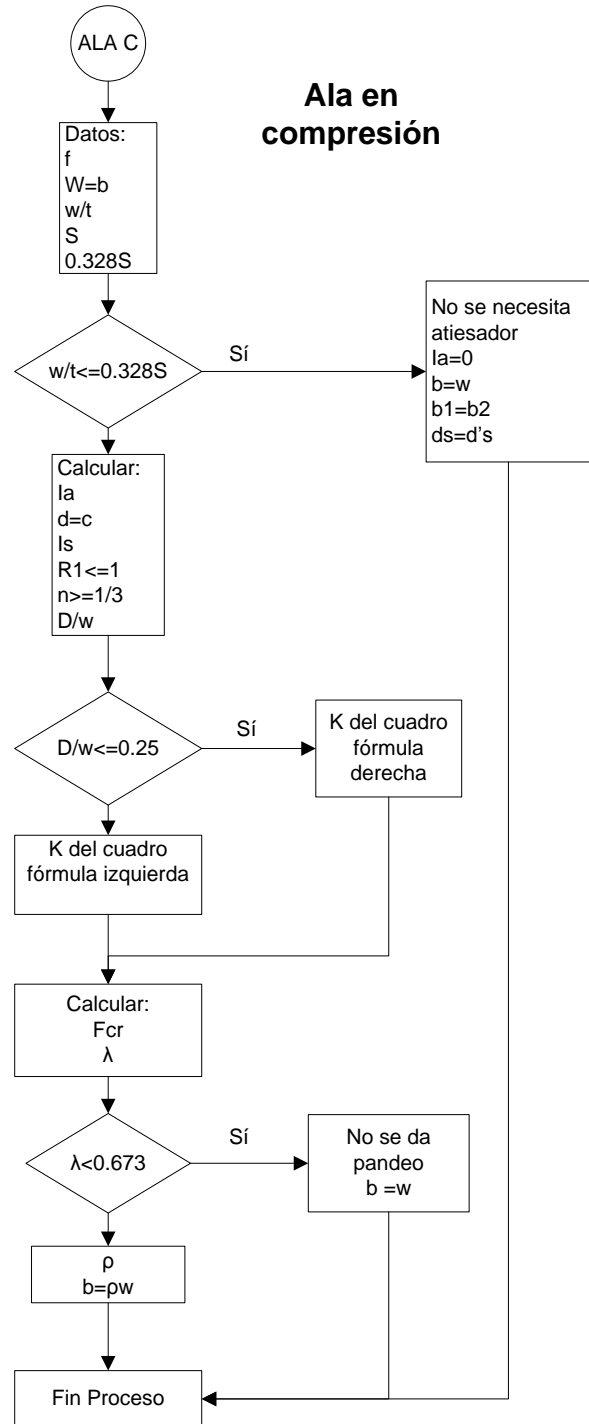


Figura 20. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho efectivo del ala en compresión. Office Visio.

Atiesador

Los perfiles laminados tipo “C”, poseen elementos atiesadores y estos a su vez son no atiesados. Cuando existe flexión alrededor del eje “x”, estos elementos están sometidos a un gradiente de esfuerzo en compresión. En la sección B3.2, se especifica el método de cálculo para los labios.

Para la determinación de w según la siguiente figura, se plantea:

$$w = d = D - 2(R + t)$$

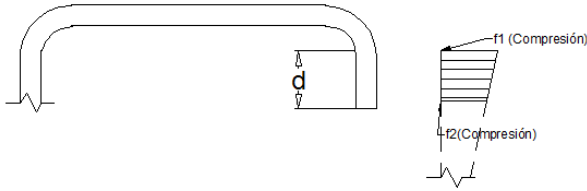


Figura 21. Elementos del atiesador y sus esfuerzos. AutoCAD.

Según la sección B3.2, el coeficiente de placa k , viene dado por:

$$\psi = |f_2 / f_1|$$

$$k = \frac{0.578}{\psi + 0.34}$$

f_1, f_2 = Esfuerzos mostrados en la figura 21, calculados con base en la sección efectiva

Según la sección B2.1, el ancho efectivo (b), será:

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

Cuando $\lambda \leq 0.673$ (no se da pandeo del labio) $ds = d's$ (cuando $w / t > 0.328S$), ó $ds = d's(R_1)$ (cuando $w / t \leq 0.328S$).

Por otro lado sí, $\lambda > 0.673$, $d's = \rho w$, entonces: $ds = d's$ (cuando $w / t > 0.328S$), ó $ds = d's(R_1)$.

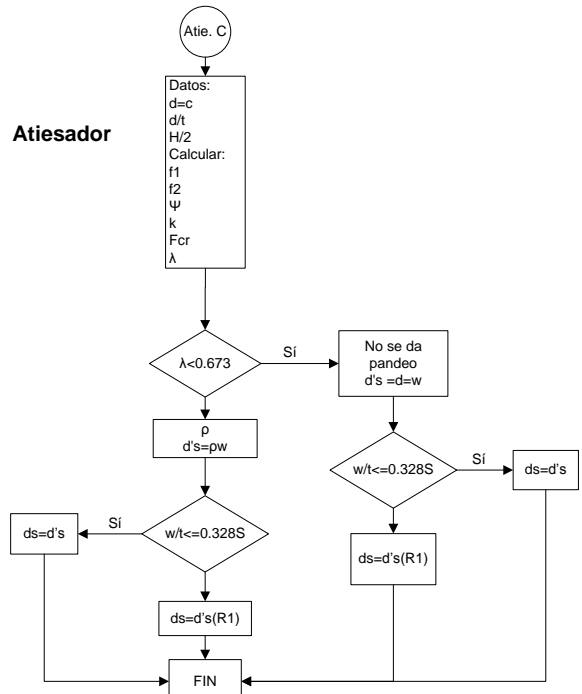


Figura 22. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho efectivo del atiesador sometido a un gradiente de esfuerzos en compresión. Office Visio.

Alma

Para la determinación de w según la siguiente figura, se plantea:

$$w = h = H - 2(R + t)$$

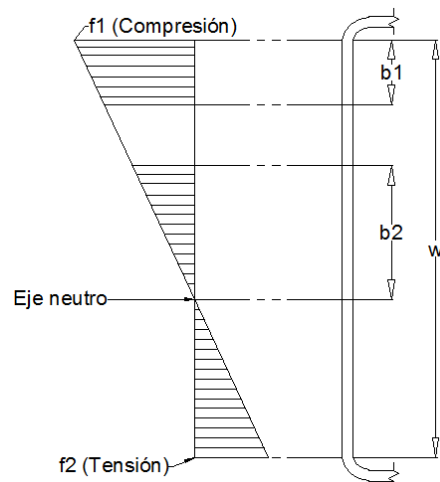


Figura 23. Elementos del alma y esfuerzos en ella, distribución de esfuerzos en un alma ya reducida. AutoCAD.

El alma cuando está cargada en flexión está sometida a un gradiente de esfuerzos de tensión en la parte inferior y varía linealmente hasta ser de compresión en la parte superior. Se diseña según la sección B2.3 del AISI.

El cálculo de los anchos efectivos b_1 y b_2 (ver figura 23), se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$\psi = |f_2 / f_1|$$

$$k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi)$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

Donde:

f_1, f_2 = Esfuerzos mostrados en la figura 23, calculados con base en sección efectiva

Según la sección B2.1 del AISI, el ancho efectivo (b), será:

$b_e = w$, cuando $\lambda \leq 0.673$ se da pandeo, todo el ancho del elemento es efectivo)

$b_e = \rho w$, cuando $\lambda > 0.673$, entonces:

Para $h_0 / b_0 \leq 4$

$$b_1 = b_e / (3 + \psi)$$

$$b_2 = b_e / 2, \text{ cuando } \psi > 0.236$$

$$b_2 = b_e - b_1, \text{ cuando } \psi \leq 0.236$$

Para $h_0 / b_0 > 4$

$$b_1 = b_e / (3 + \psi)$$

$$b_2 = \frac{b_e}{1 + \psi} - b_1$$

Es importante destacar que la suma de b_1 y b_2 no puede ser mayor que la parte del alma comprimida. Si $b_1 + b_2 \geq w/2$, el alma será completamente efectiva.

Para determinar las propiedades efectivas. Algunas veces es necesario un método iterativo;

esto ocurre cuando es necesario reducir el alma. Primero se supone una sección totalmente efectiva a un esfuerzo dado, sucesivamente cuando los elementos se reduzcan, entonces el eje neutro cambiará de posición y los factores f_1 y f_2 cambiarán. Se repiten los cálculos el número de veces que el diseñador considere necesarias, hasta que los valores converjan.

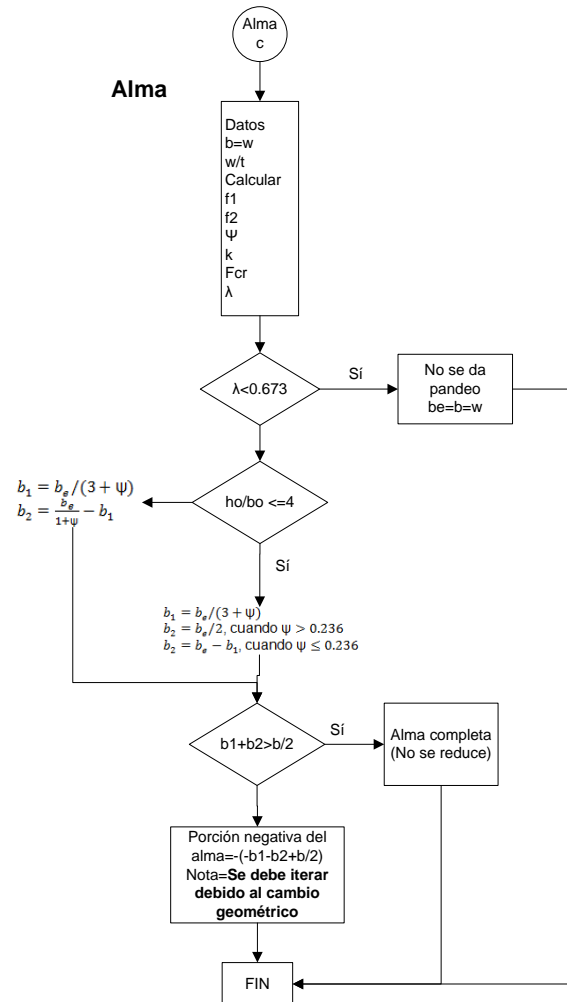


Figura 24. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho efectivo del alma en flexión. Office Visio.

Elementos estructurales tipo “C”, carga axial a compresión

De forma similar a flexión, para encontrar las propiedades efectivas del perfil C en carga axial, podría ser necesario reducir diferentes elementos que componen el perfil.

En la figura 25 se aprecian varios elementos a los cuales se les reduce anchos no efectivos, los cuales están marcados de negro. Comparando con el caso de flexión, se denota como todo el perfil está en compresión y son más los elementos que están comprometidos.

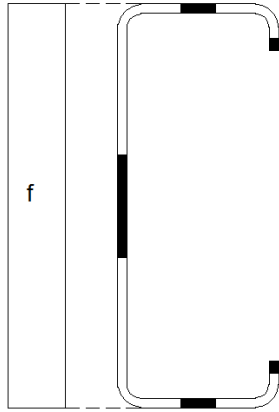


Figura 25. Sección efectiva de un perfil tipo C sometido a compresión. AutoCAD.

Ala en compresión con atiesador

En el proceso de determinar las propiedades efectivas del ala con el miembro en compresión, se sigue el mismo procedimiento mencionado para flexión con f el cual puede ser igual a F_y ó a F_n (como se define en el apartado de Miembros estructurales).

Atiesador

Para el atiesador, se sigue el siguiente procedimiento.

Se calculará el ancho efectivo siguiendo la sección B2.1. Se toma el factor k como una constante de 0.43 como lo especifica la sección B3.1.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

f =esfuerzo de compresión al que está sometido el elemento (puede ser igual a F_y ó a F_n como se define en el apartado Miembros estructurales)

Cuando $\lambda \leq 0.673$ (no se da pandeo del labio) $ds = d's$ (cuando $w/t > 0.328S$), ó $ds = d's(R_1)$ (cuando $w/t \leq 0.328S$).

Por otro lado si, $\lambda > 0.673$, $d's = \rho w$, entonces: $ds = d's$ (cuando $w/t > 0.328S$), ó $ds = d's(R_1)$.

Alma

Para el alma, se sigue el siguiente procedimiento.

Se calculará el ancho efectivo siguiendo la sección B2.1. Tomando el factor k como una constante de 4 para elementos soportados.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

$b_e = w$, cuando $\lambda \leq 0.673$ se da pandeo, todo el ancho del elemento es efectivo)

$b_e = \rho w$, cuando $\lambda > 0.673$.

f =esfuerzo de compresión al que está sometido el elemento (puede ser igual a F_y ó a F_n como se define en el apartado Miembros Estructurales).

Elementos estructurales tipo "tubo cuadrado", flexión

En los tubos estructurales rigen los mismos parámetros que en perfiles C a excepción de que los primeros al ser un cerrados, no poseen atiesadores.

En las propiedades efectivas a flexión, se puede hacer necesario reducir el ala a compresión y las almas del perfil.

Para la determinación de w , según la siguiente figura, se plantea:

$$w = d = D - 2(R + t)$$

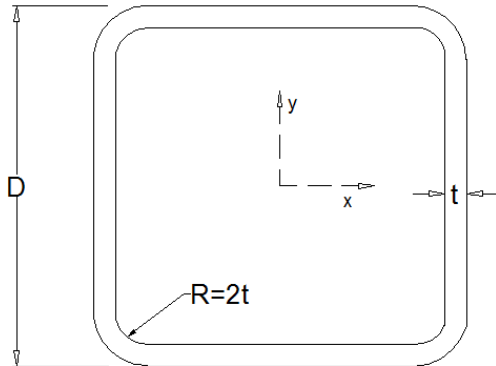


Figura 26. Tubo estructural cuadrado. AutoCAD.

Alas

Para las alas, se sigue el siguiente procedimiento: se calculará el ancho efectivo siguiendo la sección B2.1.

Tomando el factor k como una constante de 4 para elementos soportados.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

$d = w$, cuando $\lambda \leq 0.673$ (no se da pandeo)

$d = \rho w$, cuando $\lambda > 0.673$.

f = esfuerzo de compresión al que está sometido el elemento (puede ser igual a F_y ó a F_c como se define en el apartado de Miembros Estructurales).

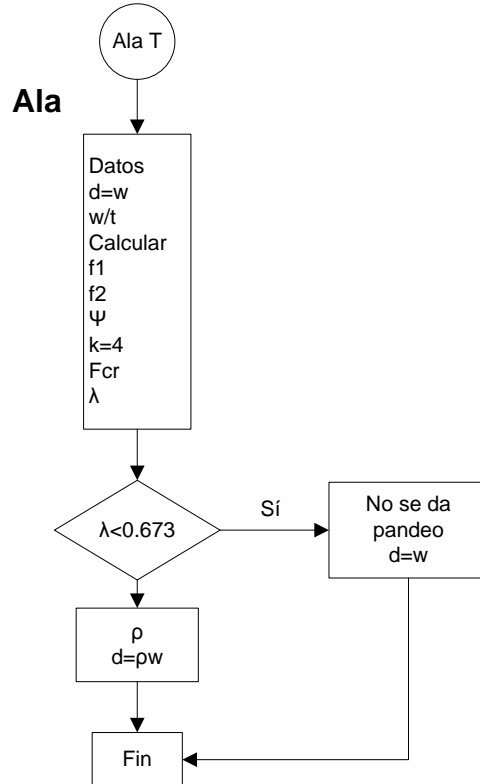


Figura 27. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho efectivo del ala en flexión para un tubo estructural. Office Visio.

Almas

Para el alma se debe seguir el mismo procedimiento que se menciono para el perfil tipo "C". Cabe destacar que también es iterativo.

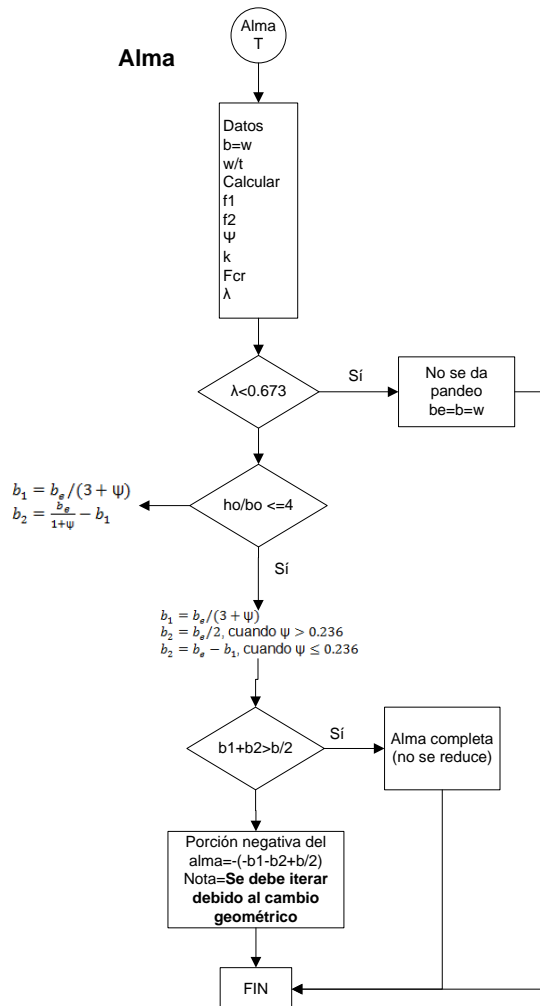


Figura 28. Diagrama de flujo para el cálculo del ancho efectivo del alma en flexión para un tubo estructural. Office Visio.

Elementos estructurales tipo “tubo cuadrado”, compresión

En el caso de compresión, se muestra la siguiente figura que ejemplifica los anchos que podrían ser necesarios de restar al tubo.

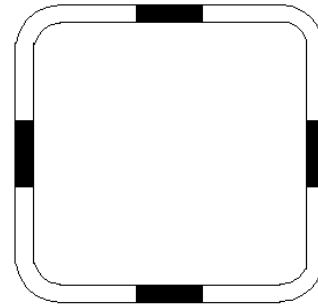


Figura 29. Sección efectiva de un tubo estructural cuadrado sometido a compresión. AutoCAD.

Alas y alma

Para todas las secciones, se sigue el siguiente procedimiento.

Se calculará el ancho efectivo siguiendo la sección B2.1. Se toma el factor k como una constante de 4.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) / \lambda$$

$d = w$, cuando $\lambda \leq 0.673$ (no se da pandeo)

$d = \rho w$, cuando $\lambda > 0.673$.

f =esfuerzo de compresión al que está sometido el elemento (puede ser igual a F_y ó a F_n como se define en el apartado de Miembros Estructurales).

Como fin de la sección se muestra (cuadro 2) una forma para calcular la inercia efectiva (I_e), así, como el módulo de sección efectiva (S_e). En el cuadro 3 se presenta el modelo para el área efectiva.

CUADRO 2. MODELO DE RESULTADOS DE PROPIEDADES EFECTIVAS PARA FLEXIÓN					
Elemento**	L [L]	y [L], de la fibra superior	$L*y$ [L] ²	$L*y^2$ [L] ³	I_x [L] ³
Ala Compresión					0
Ala Tensión					0
Alma					
Alma Negativa					
Esquina Superior Interna					
Esquina Inferior Interna					
Esquina Superior Externa					
Esquina Inferior Externa					
Atiesador Superior					
Atiesador Inferior					
Σ					

Office Excel.

**En el caso de Tubo Estructural Cuadrado, no entran los atiesadores, además tomar en cuenta que tienen dos almas y dos alas.

A continuación se presentan algunas ecuaciones necesarias para el desarrollo de propiedades efectivas:

Para el cálculo de esfuerzos en el alma:

1^{era} iteración:

$$f_1 = f_2 = f(H/2 - t/2 - r)/(H/2)$$

2^{da} y demás iteraciones:

$$f_1 = f(\bar{y} - t/2 - r)/\bar{y}$$

$$f_2 = f(H - \bar{y} - t/2 - r)/\bar{y}$$

Para el cálculo de esfuerzos en el atiesador:

1^{era} iteración:

$$f_1 = f(H/2 - t/2 - r)/H/2$$

$$f_2 = f(H/2 - D)/(H/2)$$

2^{da} y demás iteraciones:

$$f_1 = f(\bar{y} - t/2 - r)/\bar{y}$$

$$f_2 = f(\bar{y} - D)/\bar{y}$$

Para el cuadro 2:

$$c = 0.637r$$

$$y_{\text{esquina superior}} = R + t - c$$

$$y_{\text{esquina inferior}} = h_o - (R + t - c)$$

$$L_{\text{esquina}} = 1.57r$$

$$L_{\text{alma negativa}} = -(h/2 - b_1 - b_2)$$

$$y_{\text{almanegativa}} = t/2 + r + b_1 + b_{\text{neg}}/2$$

$$\bar{y} = \sum Ly / \sum L$$

$$I_{\text{ex}} = \left[\sum I_x + \sum Ly^2 - \bar{y}^2 \sum L \right] t$$

CUADRO 3. MODELO DE RESULTADOS PARA COMPRESIÓN	
Elemento**	L[L]
Ala Compresión	
Ala Compresión	
Alma	
Esquina Superior Interna	
Esquina Inferior Interna	
Esquina Superior Externa	
Esquina Inferior Externa	
Labio Superior	
Labio Inferior	
Σ	

Office Excel.

**En el caso de Tubo Estructural Cuadrado, no entran los atiesadores, además el alma se debe multiplicar por 2.

Para el área efectiva, según el cuadro 3:

$$A_e = \sum L * t$$

Miembros estructurales

Resistencia al cortante

La capacidad al cortante nominal al cortante de los miembros viene dado en la sección 3.2.1 del AISI, donde:

$$V_n = A_w F_v$$

$$\phi_v = 0.95$$

Para F_v , tenemos los siguientes casos:

Caso 1. Para $h/t \leq \sqrt{Ek_v / F_y}$

$$F_v = 0.60 F_y$$

Caso 2. Para $\sqrt{Ek_v / F_y} < h/t \leq 1.51 \sqrt{Ek_v / F_y}$

$$F_v = \frac{0.60 \sqrt{Ek_v F_y}}{(h/t)}$$

Caso 3. Para $h/t \geq 1.51 \sqrt{Ek_v / F_y}$

$$F_v = 0.904 Ek_v / (h/t)^2$$

Donde:

V_n =resistencia nominal al cortante

$k_v=5.34$, para almas sin refuerzo

E = módulo de elasticidad del acero

A_w =área del alma del elemento

$=ht$

F_v =esfuerzo nominal resistente al cortante

Resistencia a la tensión

Para los miembros sometidos a carga axial en tracción (T_n) se utilizará la sección C2 del AISI, donde tenemos 2 casos:

Caso 1: Fluencia de la sección completa.

$$T_n = A_g F_y$$

$$\phi_t = 0.95$$

Donde:

T_n = Resistencia nominal a la tracción de la sección

A_g =área bruta de la sección transversal del miembro

F_y = límite de fluencia del acero virgen, se permite incrementar según la sección A7.1 del AISI

Caso 2: Resistencia a la ruptura de la sección.

$$T_n = A_n F_u$$

$$\phi_t = 0.75$$

Donde:

T_n = Resistencia nominal a la tracción de la sección

A_n =área neta de la sección transversal del miembro

F_u = esfuerzo último del acero virgen

Capacidad a la flexión: sección tipo "C"

El factor de reducción de resistencia ϕ (LRFD) es 0.95 para vigas no sometidas al pandeo lateral-torsional. En el caso de que el diseño esté dominado por estar sometida al pandeo lateral-torsional o al pandeo distorsional, el factor ϕ (LRFD) es 0.90.

$$M_u = M_n \phi$$

El Momento nominal en una viga con la sección continuamente arriostrada.

El momento nominal viene dado por la ecuación C3.1.1-1 del AISI, es:

$$M_n = S_e F_y$$

Donde:

S_e =módulo elástico efectivo de la sección calculada a F_y en la fibra extrema de compresión

F_y =esfuerzo de fluencia del acero virgen

Para vigas con posibilidad de pandeo lateral-torsional:

Viene dado por la ecuación C3.1.2.1-2 del AISI:

$$M_n = S_c F_c$$

Donde:

S_c =módulo elástico efectivo de la sección calculada a F_c con respecto a la fibra extrema de compresión

F_c =determinado por el siguiente procedimiento:

Para $F_e \geq 2.78F_y$:

El miembro no está sujeto al pandeo lateral-torsional, la capacidad de momento nominal será calculada por el procedimiento anterior $M_n = S_e F_y$

Para $2.78F_y > F_e > 0.56F_y$:

$$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e} \right)$$

Para $F_e \leq 0.56F_y$:

$$F_c = F_e$$

Donde

F_e = esfuerzo crítico al pandeo lateral-torsional calculado según la siguiente fórmula:

$$F_e = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t}$$

Donde:

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$

Donde:

M_{max} = valor absoluto del momento máximo en el tramo no arriostrado

M_A =valor absoluto del momento a un 1/4 del tramo no arriostrado

M_B = valor absoluto del momento a un 1/2 del tramo no arriostrado

M_C = valor absoluto del momento a un 3/4 del tramo no arriostrado

C_b = se puede tomar igual a 1, siendo conservadores

r_o =radio polar del giro de la sección total alrededor del centro de cortante

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2}$$

r_x , r_y =radio del giro alrededor de los ejes principales

x_o =distancia del centro de cortante al centroide de la sección

A =área de la sección no reducida

S_f =módulo elástico de la sección no reducida

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2}$$

Donde

E =módulo de elasticidad.

K_y =coeficiente de la longitud de pandeo para la flexión alrededor del eje y

L_y = longitud no arriostrada del miembro alrededor del eje y

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]$$

Donde

G =módulo de cortante.

J =constante de la torsión de Saint-Venant

K_t =coeficiente de la longitud de pandeo a la torsión

L_t = longitud no arriostrada del miembro para la torsión

C_w =constante de alabeo de la sección

Adicionalmente si la longitud no arriostrada del elemento es menor al L_u , entonces la viga no estará sometida al pandeo lateral-torsional, con lo cual se calcula el momento, como si fuera una viga continuamente arriostrada. Donde L_u es igual a:

$$L_u = \left\{ \frac{GJ}{2C_1} + \left[\frac{C_2}{C_1} + \left(\frac{GJ}{2C_1} \right)^2 \right]^{0.5} \right\}^{0.5}$$

Donde:

$$C_1 = \frac{7.72}{AE} \left[\frac{K_y F_y S_f}{C_b \pi r_y} \right]^2$$

$$C_2 = \frac{\pi E C_w}{(K_t)^2}$$

Flexión C, sin pandeo distorsional

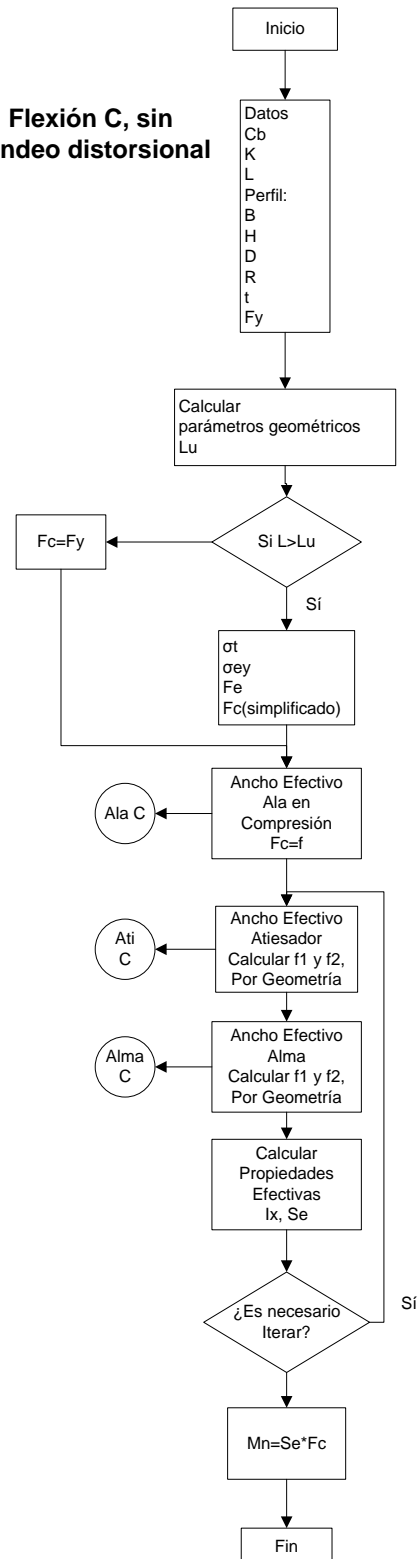


Figura 30. Diagrama de Flujo para el cálculo de momento en un perfil tipo C. Office Visio.

Para vigas sometidas al pandeo distorsional.

Se diseña de acuerdo con la sección C3.1.4 (b) del AISI, para secciones tipo "C". Siguiendo el siguiente procedimiento:

Para $\lambda_d \leq 0.673$

$$M_n = M_y$$

Para $\lambda_d > 0.673$

$$M_n = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$$

Donde

$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}}$$

$$M_y = S_{fy} F_y$$

$$M_{crd} = S_f F_d$$

Donde:

S_{fy} = módulo sección elástico de la sin reducir a la fibra extrema (para perfiles C = S_f)

S_f = módulo de sección elástico sin reducir a la fibra extrema en compresión

F_d = esfuerzo para el pandeo elástico distorsional

$$F_d = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}}$$

β = valor que depende del gradiente de momento, el AISI permite tomar este valor igual a 1 conservadoramente

k_{ϕ} = Rigidez de rotación proporcionada por un elemento de restricción a la unión alma/ala, cero si el patín de compresión no tiene restricciones o siendo conservadores cuando el valor es desconocido. Ver comentario del AISI, sección C3.1.4

$k_{\phi fe}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionada por el ala, en la unión alma/ala

$$= \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \left(\frac{EI_{yf}(x_{of} - h_x) + EC_{wf}}{-E \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} (x_{of} - h_x)^2} \right) + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f$$

$k_{\phi we}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionada por el alma, en la unión alma/ala

$$= \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{3}{h_o} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19h_o}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_o^3}{240} \right)$$

$k_{\phi fg}$ = Rigidez rotacional geométrica exigida por el ala, en la unión alma/ala

$$= \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 A_f \left[\begin{array}{l} \left(x_{of} - h_x \right)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 + h_x^2 + y_{of}^2 \\ -2y_{of}(x_{of} - h_x) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) \\ + I_{xf} + I_{yf} \end{array} \right]$$

$k_{\phi wg}$ = Rigidez rotacional geométrica exigida por el alma, en la unión alma/ala

$$= \frac{h_o t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1 - \xi_{alma}) + 62160] \left(\frac{L}{h_o} \right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_o}{L} \right)^2 [53 + 3(1 - \xi_{alma})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_o} \right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_o} \right)^4} \right)$$

$\xi_{alma} = (f_1 - f_2) / f_1$, gradiente de esfuerzos en el alma, donde f_1 y f_2 son los esfuerzos en los lados opuestos del alma, $f_1 > f_2$, compresión positiva, tensión es negativa. El esfuerzo calculado basado en la sección completa, por ejemplo en flexión pura, entonces $f_1 = -f_2$, entonces $\xi_{alma} = 2$.

Donde

L= el mínimo de L_{cr} y L_m .

Donde

$$L_{cr} = \left(\frac{4\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left(\frac{I_{xf} (x_{of} - h_x)^2 + C_{wxf}}{I_{yf}^2} (x_{of} - h_x)^2 \right) + \frac{\pi^4 h_o^4}{720} \right)^{1/4}$$

L_m =distancia entre arriostres o apoyos que restringen el pandeo distorsional

Capacidad a compresión: sección tipo "C".

Para miembros en compresión, el cálculo se debe hacer según la sección C4 de AISI.

El factor de resistencia ϕ_c (LRFD) es 0.85. La resistencia nominal a la compresión axial (P_n), será:

$$P_u = P_n \phi$$

Donde:

$$P_n = A_e F_n$$

Donde:

A_e = área efectiva calculada a un esfuerzo de compresión F_n , según la sección de áreas efectivas

F_n = esfuerzo determinado según el siguiente procedimiento

Para $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$$

Para $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y$$

Donde:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

F_y =esfuerzo de fluencia del acero virgen
 F_e = menor esfuerzo aplicable de pandeo en flexión, torsión, y flexo-torsión

determinado según la sección C4.1.1 y C4.1.2. Calculados en los siguientes casos:

CASO 1. Para secciones no sujetas al pandeo torsional o flexo-torsional:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

Donde:

K = coeficiente de la longitud efectiva de pandeo

L = longitud no arriostada del miembro

r =radio de giro de la sección alrededor del eje del pandeo

CASO 2. Para secciones sujetas al pandeo torsional o flexo-torsional

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right]$$

Donde:

$$\beta = 1 - (x_o / r_o)^2$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$$

Donde

E =módulo de elasticidad

K_x =coeficiente de la longitud de pandeo para la flexión alrededor del eje x

L_x = longitud no arriostada del miembro alrededor del eje x

σ_t, x_o, r_o = definidos anteriormente

Columnas sometidas al pandeo distorsional

Se diseña de acuerdo con la sección C4.2(b) del AISI.

Si en el diseño se rige por este tipo de pandeo se debe utilizar un factor ϕ (LRFD) de 0.85, entonces se obtiene una carga última de:

$$P_u = P_n \phi$$

Para obtener P_n , se utiliza el siguiente procedimiento:

Para $\lambda_d \leq 0.561$

$$P_n = P_y$$

Para $\lambda_d > 0.561$

$$P_n = \left(1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$$

Donde:

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}}$$

P_n = resistencia nominal a la compresión

$$P_y = A_g F_y$$

A_g =área bruta de la sección

F_y =esfuerzo de fluencia del acero

$$P_{crd} = A_g F_d$$

Donde:

F_d = esfuerzo para el pandeo elástico distorsional.

Donde:

$$F_d = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}}$$

$k_{\phi fe}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionada por el ala, en la unión alma/ala, fórmula presentada anteriormente.

$k_{\phi we}$ = Rigidez rotacional elástica proporcionada por el alma, en la unión alma/ala

$$= \frac{Et^3}{6h_o(1-\mu^2)}$$

k_{ϕ} = Rigidez de rotación proporcionada por un elemento de restricción a la unión alma/ala, cero si el patín de compresión no tiene restricciones o siendo conservadores cuando el valor es desconocido. Ver comentario del AISI, sección C3.1.4

$k_{\phi fg}$ = Rigidez rotacional geométrica exigida por el ala, en la unión alma/ala, fórmula presentada anteriormente.

$k_{\phi wg}$ = Rigidez rotacional geométrica exigida por el alma, en la unión alma/ala

$$= \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_o^3}{60}$$

Donde

L = el mínimo de L_{cr} y L_m .

Donde

$$L_{cr} = \left(\frac{6\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left(\frac{I_{xf} (x_{of} - h_x)^2 + C_{wf}}{I_{yf} (x_{of} - h_x)^2} \right) \right)^{1/4}$$

L_m =distancia entre arriostres o apoyos que restringen el pandeo distorsional

Capacidad a flexión: “tubo estructural cuadrado”

El factor de reducción de resistencia ϕ (LRFD) es 0.95. El momento último viene dado por:

$$M_u = M_n \phi$$

Si la longitud no arriostrada del miembro es menor o igual que L_u , entonces la capacidad nominal de momento viene dada por la ecuación C3.1.1-1 del AISI, así:

$$M_n = S_e F_y$$

Donde:

S_e =módulo elástico efectivo de la sección calculada a F_y en la fibra extrema de compresión

F_y =esfuerzo de fluencia del acero virgen
 L_u , se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_u = \frac{0.36 C_b \pi \sqrt{EGJ}}{F_y S_f}$$

Si por el contrario, la longitud no arriostrada es mayor a L_u , entonces viene dada por la ecuación C3.1.2.1-2 del AISI:

$$M_n = S_c F_c$$

Donde:

S_c =módulo elástico efectivo de la sección calculada a F_c con respecto a la fibra extrema de compresión

F_c =determinado por el siguiente procedimiento:

Para $F_e \geq 2.78F_y$:

El miembro no está sujeto al pandeo lateral-torsional, la capacidad de momento nominal será calculada por el procedimiento anterior : $M_n = S_e F_y$.

Para $2.78F_y > F_e > 0.56F_y$:

$$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e} \right)$$

Para $F_e \leq 0.56F_y$:

$$F_c = F_e$$

Donde F_e , es el esfuerzo crítico de pandeo lateral-torsional:

$$F_e = \frac{C_b \pi}{K_y L_y S_f} \sqrt{EGJ_y}$$

Donde:

J=Constante Torsional de sección tipo caja.

I_y =momento de inercia con respecto al eje "y" de la sección sin reducir.

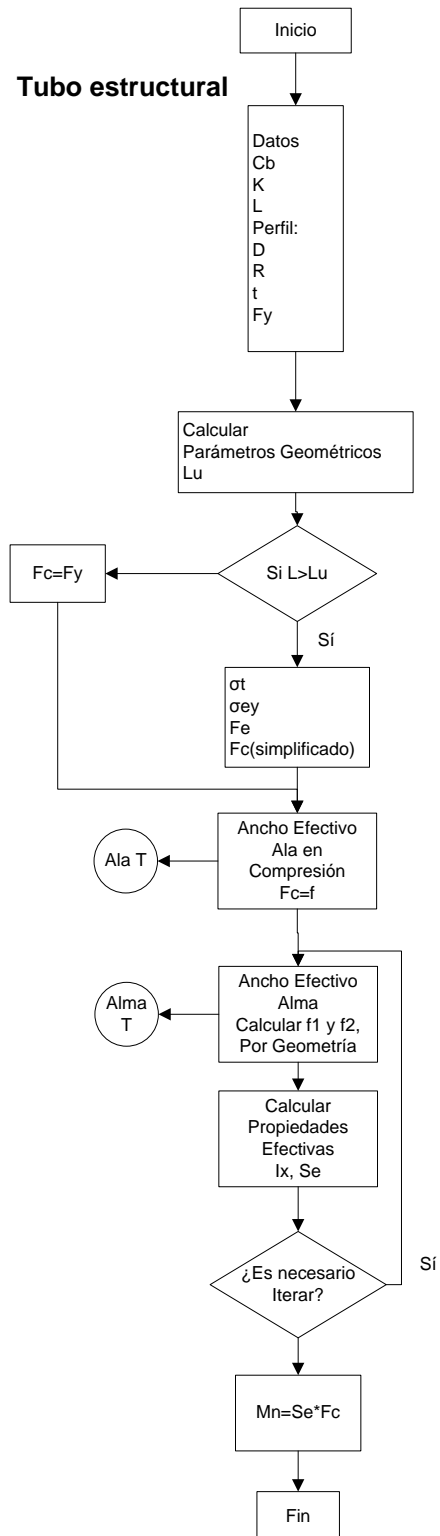


Figura 31. Diagrama de Flujo para el cálculo de momento en un perfil tipo tubo estructural. Office Visio.

Capacidad a compresión. “tubo estructural cuadrado”

Para miembros en compresión se calcula según la sección C4 de AISI.

El factor de resistencia ϕ_c (LRFD) es 0.85.

La resistencia nominal a la compresión axial (P_n), será:

$$P_n = A_e F_n$$

Donde:

A_e = área efectiva calculada a un esfuerzo de compresión F_n , según la sección de áreas efectivas.

F_n = esfuerzo determinado según el siguiente procedimiento:

Para $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$$

Para $\lambda_c > 1.5$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y$$

Donde:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

Donde:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

K = coeficiente de la longitud efectiva de pandeo.

L = longitud no arriostrada del miembro.

r =radio de giro de la sección.

Resultados

Hoja de cálculo

La hoja de cálculo se compone de cinco formularios: dos son para perfiles tipo C, uno para tubo estructural cuadrado, uno para el manejo de las bases de datos y el último muestra propiedades de los perfiles:

En la figura 32 se presenta el formulario de flexión para perfiles C, el usuario de la hoja de cálculo introduce un valor de C_b para la viga, aunque este es de 1 por defecto, luego se selecciona el perfil del cual se desea la información. La línea roja representa la resistencia al pandeo distorsional.

En el formulario presentado en la figura 33 están los datos de perfiles C, para flexión y

compresión. El “*” indica que en ese punto el perfil supera la resistencia al pandeo distorsional. El siguiente formulario, en la figura 34, similar al anterior presenta los datos de los perfiles cuadrados en los formularios. A diferencia de los perfiles C, los cuadrados son más estables al momento, por ende solo se presenta una tabla para compresión.

Los formularios de las figuras 35 y 36 son para el manejo de datos. El primero permite agregar nuevos perfiles a la hoja; el segundo presenta propiedades geométricas de los perfiles.

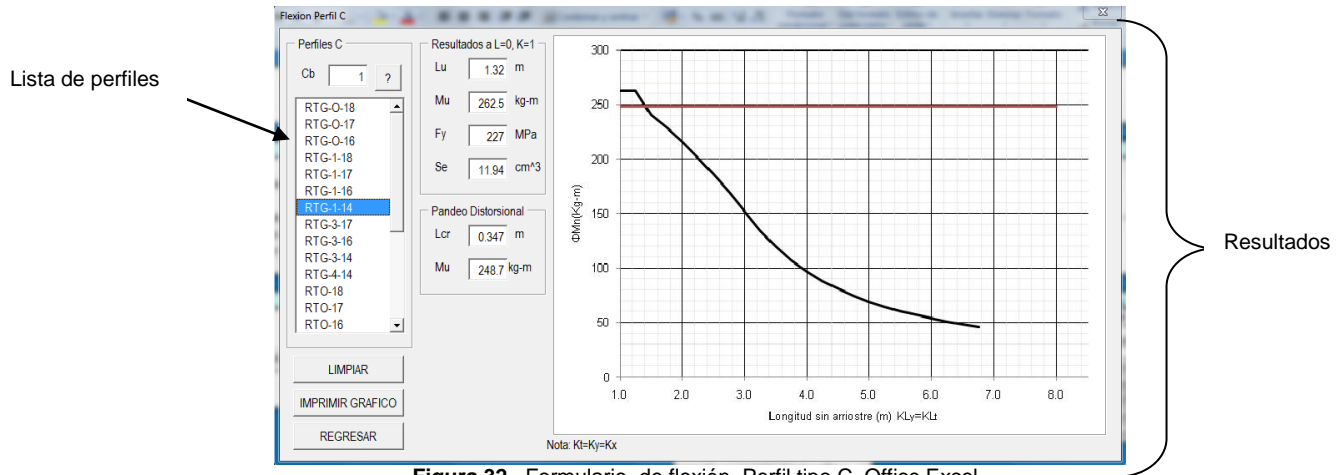


Figura 32. Formulario de flexión, Perfil tipo C. Office Excel

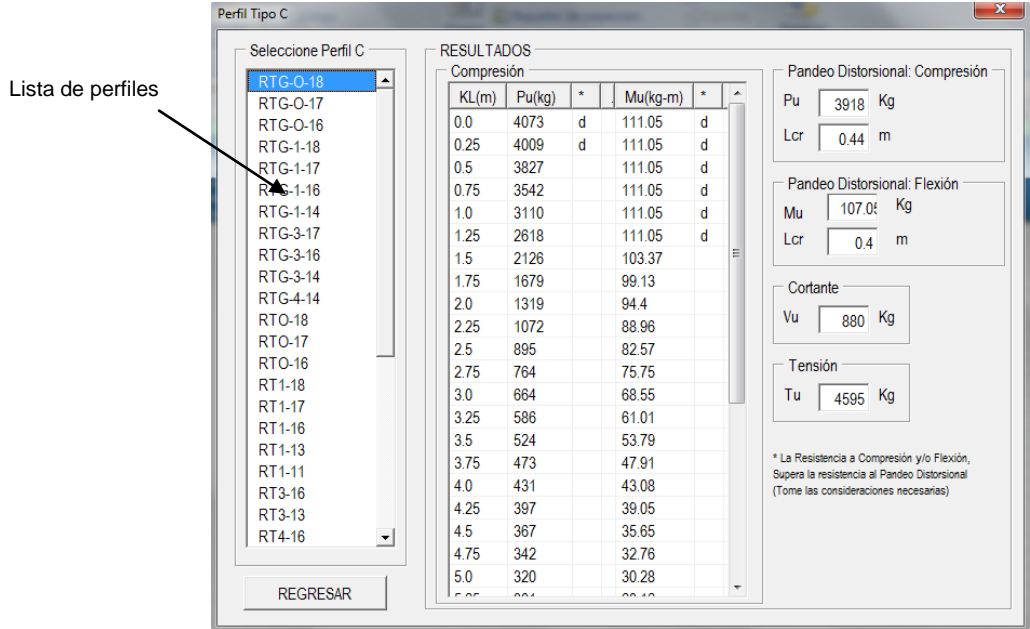


Figura 33. Formulario con datos de Perfil Tipo C. Office Excel

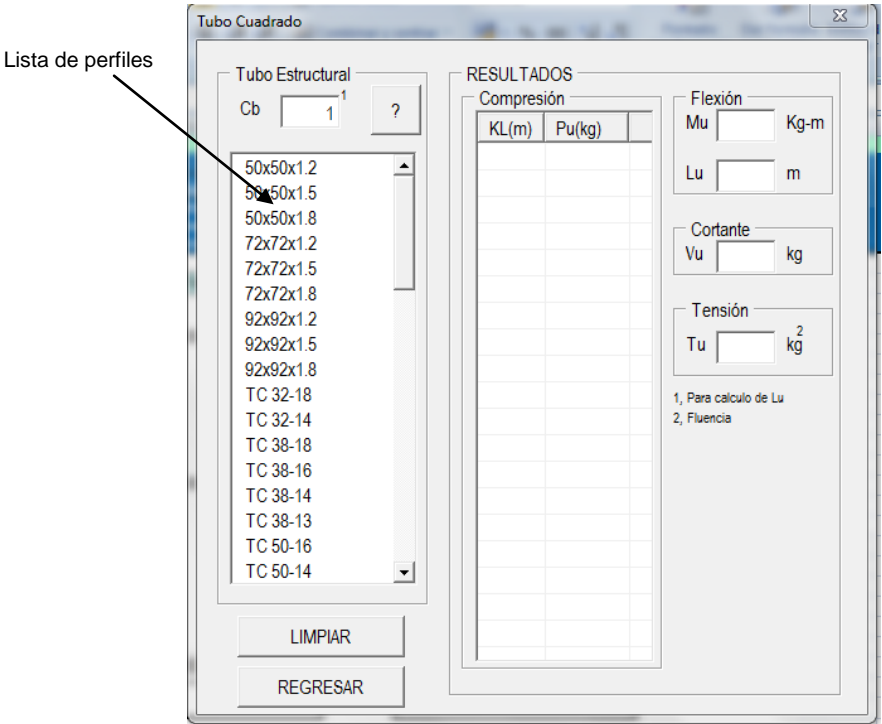


Figura 34. Formulario con datos de Tubo Estructural Cuadrado. Office Excel

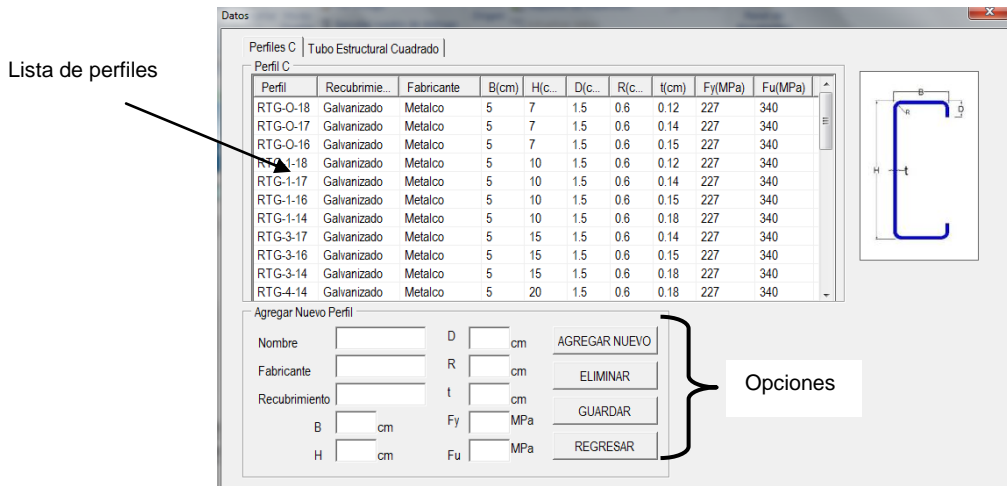


Figura 35. Formulario con datos de los perfiles presentes de la hoja. Office Excel

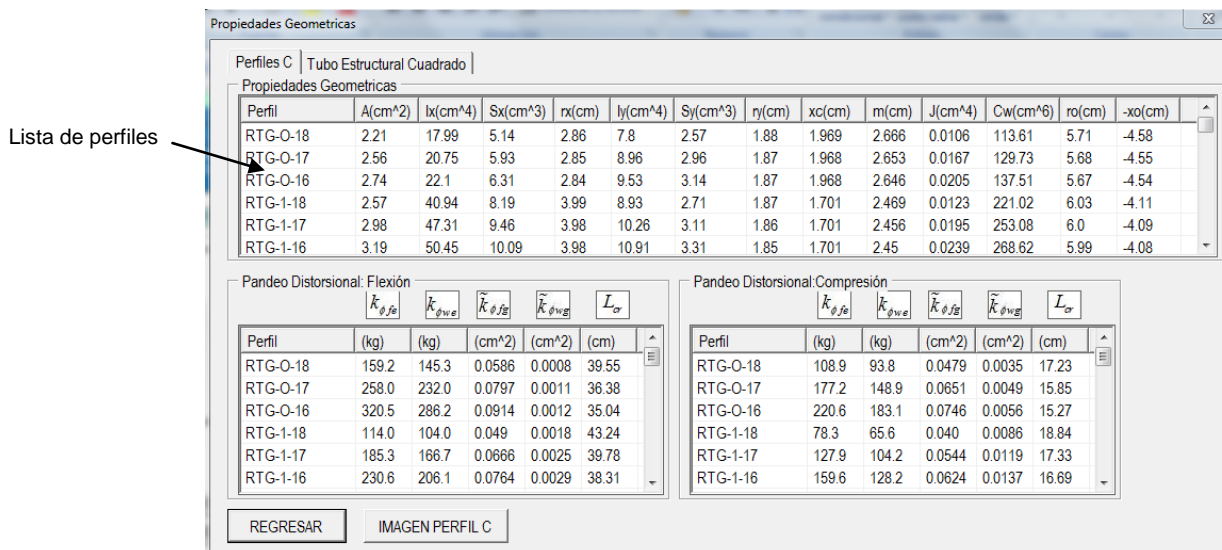


Figura 36. Formulario con propiedades geométricas de los perfiles. Office Excel

Ayudas de diseño

Las tablas y figuras para los perfiles encontrados en el mercado nacional se encuentran en la sección apéndices.

A continuación, en el cuadro 4 se muestra un ejemplo de tabla de ayuda de diseño. Esta tabla está hecha para un perfil tipo C. Cabe destacar que no toma en cuenta el pandeo distorsional. En los cuadros 5 y 6 se presentan los datos de cortante-tensión y resistencia al pandeo distorsional.

En el cuadro 7 se presentan las tablas para tubos estructurales.

CUADRO 4. EJEMPLO DE PRESENTACIÓN DE PERFIL A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN		
Perfiles	RTG-1-16/RT1-16	
Fuente:	METALCO	
KL(m)	M _u (kg-m)	P _u (kg)
0.00	221.8	5721
0.25	221.8	5654
0.50	221.8	5458
0.75	221.8	5152
1.00	221.8	4760
1.25	221.8	4312
1.50	203.9	3838
1.75	193.7	3362
2.00	182.3	2903
2.25	169.7	2437
2.50	156.0	2036
2.75	141.5	1740
3.00	126.1	1514
3.25	110.3	1337
3.50	97.1	1197
3.75	86.4	1083
4.00	77.7	990
4.25	70.4	912
4.50	64.2	822
4.75	59.0	738
5.00	54.5	666
5.25	50.6	604
5.50	47.1	550
5.75	44.1	504
6.00	41.5	463
6.25	39.1	426
6.50		394
6.75		365
7.00		340
7.25		317
7.50		296
7.75		277
8.00		260

Office Excel

CUADRO 5. EJEMPLO DE RESISTENCIA AL CORTANTE Y A LA TENSIÓN		
Perfil	V _u (kg)	T _u (kg)
RTG-O-18/RTO-18	880	4595

Office Excel

CUADRO 6. EJEMPLO DE RESISTENCIA AL PANDEO DISTORSIONAL $k_{\phi} = 0$				
Perfil	Flexión		Carga Axial	
	M _u (kg-m)	L _{cr} (m)	P _u (kg)	L _{cr} (m)
RTG-O-18/RTO-18	107.0	0.40	3918	0.44

Office Excel

CUADRO 7. EJEMPLO DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES DE TUBOS.					
Tubo	Fuente	M _u (kg-m)	L _u (kg)	V _u (kg)	T _u (kg)
1 1/2" X 1 1/2" X 1/8	Aceros Roag	122.8	11.5	2228	11640

Office Excel

Revisión

Para realizar las revisiones de la hoja de cálculo, se utilizaron los perfiles de la norma AISI. Se ingresaron los datos de los mismos y se comparan los resultados con la hoja de cálculo.

A continuación se presentan unas comparaciones con el perfil C: 6CS2.5x0.59, los datos de dimensiones del perfil están disponibles en la tabla I-2 del manual. También se utilizó el módulo de elasticidad del manual AISI que es distinto al especificado para los perfiles nacionales.

En el cuadro 8 se muestran los datos de compresión tomados del manual. Debido a que el manual está en unidades inglesas, se deben utilizar equivalencias, después se introduce de en la hoja los valores buscados.

CUADRO 8. DATOS DEL PERFIL 6CS2.5x0.59 A CARGA AXIAL (F _y =33ksi, TABLA III-7 AISI)	
KL [pies] (m)	P _n (kips)
[3] (0.91)	16.8
[5] (1.524)	14.6
[10] (3.048)	7.99
[15] (4.57)	4.30

Office Excel

En el cuadro 9 se presentan los resultados de la comparación realizada; cabe mencionar que los valores de la hoja tuvieron que ser divididos por

el factor de resistencia correspondiente al LRFD, para obtener el valor nominal.

CUADRO 9. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE COMPRESIÓN DEL PERFIL 6CS2.5x0.59			
KL [pies] (m)	P _n (kg) AISI	P _n (kg) hoja cálculo	% Dif
[3](0.91)	7560	7614	-0.71%
[5](1.524)	6570	6619	-0.75%
[10](3.048)	3596	3625	-0.82%
[15](4.57)	1935	1954	-0.98%

Office Excel

Similar al cuadro 8, en el cuadro 10 se presentan los datos de resistencia al cortante, al momento y el módulo de sección efectivo a F_y.

En el cuadro 11 se presenta la comparación de los resultados con los datos del cuadro 10.

CUADRO 10. DATOS DEL PERFIL 6CS2.5x0.59 (TABLA II-1, AISI)	
V _n (kips)	4.76
M _n (kip-in)	43.1
S _e (in ³)	1.31

Office Excel

CUADRO 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE COMPRESIÓN DEL PERFIL 6CS2.5x0.59			
Parámetros	AISI	Hoja de cálculo	% Dif
V _n (kg)	2164	2160	0.17%
M _n (kg-m)	496	497	-0.11%
S _e (cm ³)	21.47	21.42	0.22%

Office Excel

Para la revisión de los datos del tubo estructural, se toma el tubo cuadrado del ejemplo II-8 del manual del AISI, donde se pide calcular el momento nominal de la sección. Esta sección tiene como datos: D=6 in, R=0.0494 in, t=0.125 in y F_y de 46ksi. Los resultados son:

CUADRO 12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MOMENTO DEL PERFIL DEL EJEMPLO II-8		
Mu[klb-pie] (kg-m) AISI	Mu (kg-m) Hoja de Cálculo	Dif%
[18.1] (2502)	2489	0.52%

Office Excel

Análisis de los resultados

La hoja de cálculo hecha en Excel, se hizo con la intención de que sea de utilidad en el diseño de perfiles laminados en frío para lo cual da valores de resistencia de flexión, compresión, cortante y tensión.

El usuario necesita pocos datos para la obtención de resistencias. En el caso de vigas solamente el C_b , en caso de columnas se tiene por longitud equivalente efectiva KL . En los demás basta con la sola sección del perfil.

Como precaución, al utilizar las tablas es necesaria la revisión al modo de pandeo distorsional; al diseñar un elemento sin arriostres en los patines de compresión se debe revisar la resistencia a este pandeo que no depende ni de C_b , K_y , y K_t ; en el caso de vigas, ni de K para columnas. Si esta resistencia es menor a la de otros tipos de falla (torsional-lateral, pandeo local, flexo torsional) entonces regirá el diseño.

En un formulario adicional, si el usuario que utiliza la hoja puede agregar nuevos perfiles. En otro formulario se pueden ver las propiedades sin reducir de las secciones como áreas, inercias, radios de giro, etc.

La ventaja de realizar una hoja de cálculo reside en su flexibilidad y facilidad de actualización a los cambios que sean necesarios.

Además, se producen tablas y figuras con un número determinado de perfiles, las cuales se esperan que sean de utilidad en el caso de no poseer o no tener disponible la hoja de cálculo.

Los porcentajes de diferencia en la comparación de los perfiles AISI y los resultados de la hoja de cálculo dan todos menor a 1%, por lo que se acepta como herramienta de ayuda en el diseño.

Como limitación se ha de destacar que no se obtienen otras fuentes de información fiables para realizar revisiones de la hoja de cálculo, a excepción de las presentadas por AISI.

Otra limitación de los cálculos es que se suponen los elementos libres, hasta KL , en todos los ejes; no existen opciones para administrar

arriostres en diferentes ejes de falla a diferentes longitudes (flexión y carga axial).

Revisando las capacidades de los perfiles RTG-O-18/RTO-18 y los perfiles RTG-O-16/RTO-16 (ver apéndices) se observa que poseen las mismas dimensiones pero con diferentes espesores. La capacidad a flexión del primero es de 111.01 kg-m, la del segundo es de 139.0 kg-m, lo cual significa que la capacidad a flexión se ve reducida en alrededor de un 20%. Por otra parte, la capacidad al cortante se ve reducida en un 23%. Se hace indispensable la inspección en la construcción de este tipo de elementos, ya que un 20% de pérdida en resistencia podría llegar a comprometer la seguridad de cualquier estructura.

El diseñador debe tener presente la fragilidad de las estructuras compuestas de perfiles laminados en frío como se considera en el CSCR. Esto significa que no se debe caer en prácticas inseguras, se debe limitar a estructuras livianas y no esenciales.

Como limitaciones se tiene que para completar un diseño se deben revisar otras condiciones de resistencia como lo menciona el manual de diseño de la AISI. Se debe considerar:

- Cálculos de resistencia: aplastamiento del alma, interacción entre flexión-cortante, flexión-torsión, flexión-falla del alma, flexo-compresión, flexo-tensión.
- Diseño de perfiles con huecos.
- Condiciones de servicio (deformaciones).
- Diseño de conexiones ya sean soldadas o con tornillos.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones:

Del estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

Las propiedades efectivas de cada miembro dependen del esfuerzo al que estén sometidos los elementos. Estos esfuerzos varían según las condiciones a las que está sometida el miembro.

Los perfiles abiertos tipo C, son más inestables que los tubos estructurales. Debido a que son afectados por modos de falla adicionales como pandeo lateral, torsional, distorsional.

La hoja de cálculo asiste en la resolución de problemas de diseño estructural para perfiles laminados en frío. Además permite obtener tablas y figuras para el diseño de este tipo de elementos.

Considerando la limitación de que el autor no es experto en programación, se desarrolló una hoja de cálculo que se puede actualizar fácilmente e ir añadiendo módulos conforme a las necesidades del usuario.

Revisar las especificaciones de los perfiles en procesos constructivos, ya que la resistencia de las estructuras puede verse comprometida.

Tomar en cuenta las limitaciones impuestas por el Código Sísmico de Costa Rica respecto al uso de estructuras de acero laminado en frío.

Recomendaciones

El análisis realizado permite plantear como recomendaciones, lo siguiente:

Para completar un diseño en perfiles laminados se requiere más desarrollo que el presentado; se debe tomar en cuenta a los modos de falla como aplastamiento del alma en los apoyos (web crippling), los efectos de torsión y las combinaciones de flexión-cortante, flexión-aplastamiento del alma, flexo-compresión y flexo-tensión. El diseño de conexiones también debe de tomarse en cuenta.

Solicitar a los distribuidores y fabricantes etiquetar el producto con las propiedades dimensionales y tipo de acero del que está compuesto el perfil.

Apéndices

- Tablas de momento y carga axial para perfiles C.
- Figuras de Momento contra KL para perfiles C.
- Tablas de resistencia al pandeo distorsional, cortante y tensión para perfiles C.
- Tablas de momento, carga axial, cortante y tensión para tubo estructural.
- Figura con valores de K.

Resistencia al Momento y Compresión. (No se incluye Resistencia al Pandeo Distorsional). Preparadas por Geiner Oviedo.

Perfil	RTG-O-18/RTO-18		RTG-O-17/RTO-17		RTG-O-16/RTO-16		RTG-1-18/RT1-18		RTG-1-17/RT1-17	
Fuente:	METALCO		METALCO		METALCO		METALCO		METALCO	
KL(m)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)
0.00	111.0	4067.1	129.9	4984.1	139.0	5381.5	176.2	4217.3	207.0	5225.4
0.25	111.0	4001.7	129.9	4908.0	139.0	5265.9	176.2	4175.7	207.0	5179.5
0.50	111.0	3817.8	129.9	4621.5	139.0	4937.7	176.2	4056.0	207.0	5003.3
0.75	111.0	3526.3	129.9	4161.5	139.0	4447.4	176.2	3872.5	207.0	4717.6
1.00	111.0	3090.3	129.9	3610.1	139.0	3861.8	176.2	3602.6	207.0	4352.0
1.25	111.0	2595.5	129.9	3029.3	139.0	3247.9	176.2	3252.1	207.0	3933.8
1.50	103.1	2101.2	120.8	2470.4	129.0	2659.3	162.0	2878.3	190.7	3490.1
1.75	98.8	1651.6	115.6	1967.5	123.3	2131.1	154.5	2501.6	181.0	3044.8
2.00	93.9	1297.8	109.5	1558.4	116.9	1696.9	146.1	2138.2	169.9	2616.5
2.25	88.5	1055.0	102.8	1277.7	110.0	1397.4	135.9	1796.3	157.7	2206.7
2.50	82.0	881.0	95.7	1076.3	102.6	1182.3	124.1	1517.4	144.5	1837.8
2.75	75.0	752.0	88.2	926.6	94.8	1022.2	111.3	1291.5	130.3	1564.5
3.00	67.7	653.6	80.3	812.2	86.8	899.7	97.6	1111.7	115.2	1356.4
3.25	60.0	576.7	72.1	722.6	78.4	803.4	84.4	971.6	100.2	1194.2
3.50	52.9	515.4	64.1	650.8	70.0	726.2	73.9	860.4	88.1	1065.1
3.75	47.1	465.7	57.3	592.4	62.8	663.1	65.3	770.5	78.2	960.8
4.00	42.4	424.8	51.8	543.9	56.9	610.7	58.4	696.8	70.1	875.0
4.25	38.4	390.5	47.2	503.2	52.0	566.4	52.5	635.6	63.4	803.7
4.50	35.1	361.6	43.3	468.6	47.8	528.6	47.7	584.1	57.8	743.6
4.75	32.2	336.8	40.0	438.7	44.2	495.8	43.5	540.5	52.9	682.1
5.00	29.8	315.4	37.1	412.7	41.1	467.2	40.0	503.1	48.8	615.6
5.25	27.7	296.7	34.6	389.8	38.4	441.8	36.9	470.7	45.2	558.4
5.50	25.8	280.3	32.4	369.4	36.0	419.1	34.2	442.6	42.1	508.8
5.75	24.2	265.7	30.5	351.2	33.9	398.8	31.9	405.0	39.4	465.5
6.00	22.7	252.7	28.7	334.7	32.0	380.3		372.0	37.0	427.5
6.25	21.5	241.0	27.2	319.8	30.3	363.4		342.8		394.0
6.50	20.3	230.3	25.8	306.1	28.8	338.2		316.9		364.3
6.75		220.6	24.6	293.5	27.5	313.6		293.9		337.8
7.00		211.8	23.4	274.3	26.2	291.6		273.3		314.1
7.25		203.6		255.7	25.1	271.8		254.8		292.8
7.50		196.0		238.9	24.1	254.0		238.1		273.6
7.75		189.0		223.7		237.9		222.9		256.2
8.00		182.4		210.0		223.2		209.2		240.5

Resistencia al Momento y Compresión. (No se incluye Resistencia al Pandeo Distorsional). Preparadas por Geiner Oviedo.

Perfil	RTG-1-16/RT1-16		RTG-1-14		RTG-3-17		RTG-3-16		RTG-3-14	
Fuente:	METALCO		METALCO		METALCO		METALCO		METALCO	
KL(m)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)
0.00	221.9	5709.4	262.5	7124.7	356.6	5389.6	382.8	5912.2	454.0	7479.1
0.25	221.9	5641.1	262.5	7038.4	356.6	5357.8	382.8	5865.0	454.0	7419.0
0.50	221.9	5442.6	262.5	6788.6	356.6	5241.8	382.8	5725.8	454.0	7241.4
0.75	221.9	5132.0	262.5	6400.0	356.6	5036.7	382.8	5501.2	454.0	6955.1
1.00	221.9	4735.4	262.5	5908.1	356.6	4763.2	382.8	5202.1	454.0	6573.4
1.25	221.9	4283.0	262.5	5352.4	356.6	4434.0	382.8	4841.8	454.0	6113.6
1.50	203.5	3804.3	240.9	4755.3	325.2	4063.2	347.0	4436.0	411.4	5595.5
1.75	193.1	3325.1	228.9	4122.4	306.7	3665.7	327.3	4000.9	388.3	5039.5
2.00	181.4	2865.1	215.6	3534.9	285.7	3256.1	305.0	3552.4	362.2	4465.9
2.25	168.6	2396.7	201.2	3007.4	262.2	2847.7	280.1	3105.0	333.3	3893.1
2.50	154.7	2003.1	185.7	2547.1	236.4	2452.0	252.8	2669.7	301.9	3332.7
2.75	139.9	1711.5	169.4	2200.8	208.4	2089.6	223.2	2275.1	268.1	2834.1
3.00	124.2	1489.3	152.3	1936.3	178.8	1805.5	191.9	1964.7	232.3	2440.2
3.25	108.5	1316.0	134.7	1729.5	154.0	1577.5	165.6	1715.2	201.3	2085.5
3.50	95.5	1178.1	119.3	1564.4	134.3	1391.0	144.6	1510.8	176.6	1798.2
3.75	85.0	1066.4	106.9	1365.2	118.4	1236.0	127.7	1335.0	156.7	1566.4
4.00	76.4	974.6	96.6	1199.9	105.4	1103.3	113.8	1173.3	140.3	1376.8
4.25	69.2	898.0	88.0	1062.8	94.6	977.3	102.3	1039.4	126.7	1219.6
4.50	63.2	808.2	80.7	948.0	85.5	871.7	92.6	927.1	115.2	1087.8
4.75	58.0	725.3	74.5	850.9	77.8	782.4	84.4	832.1	105.5	976.3
5.00	53.6	654.6	69.2	767.9	71.2	706.1	77.3	750.9	97.1	881.1
5.25	49.7	593.8	64.5	696.5	65.5	640.5	71.3	681.1	89.9	799.2
5.50	46.4	541.0	60.4	634.6		583.6		620.6	83.6	728.2
5.75	43.4	495.0	56.8	580.6		533.9		567.8		666.3
6.00	40.8	454.6	53.6	533.3		490.3		521.5		611.9
6.25	38.5	419.0	50.8	491.5		451.9		480.6		563.9
6.50		387.4	48.2	454.4		417.8		444.3		521.4
6.75		359.2	45.9	421.3		387.4		412.0		483.5
7.00		334.0		391.8		360.3		383.1		449.6
7.25		311.4		365.2		335.8		357.2		419.1
7.50		290.9		341.3		313.8		333.7		391.6
7.75		272.5		319.6		293.9		312.6		366.8
8.00		255.7		300.0		275.8		293.3		344.2

Resistencia al Momento y Compresión. (No se incluye Resistencia al Pandeo Distorsional). Preparadas por Geiner Oviedo.

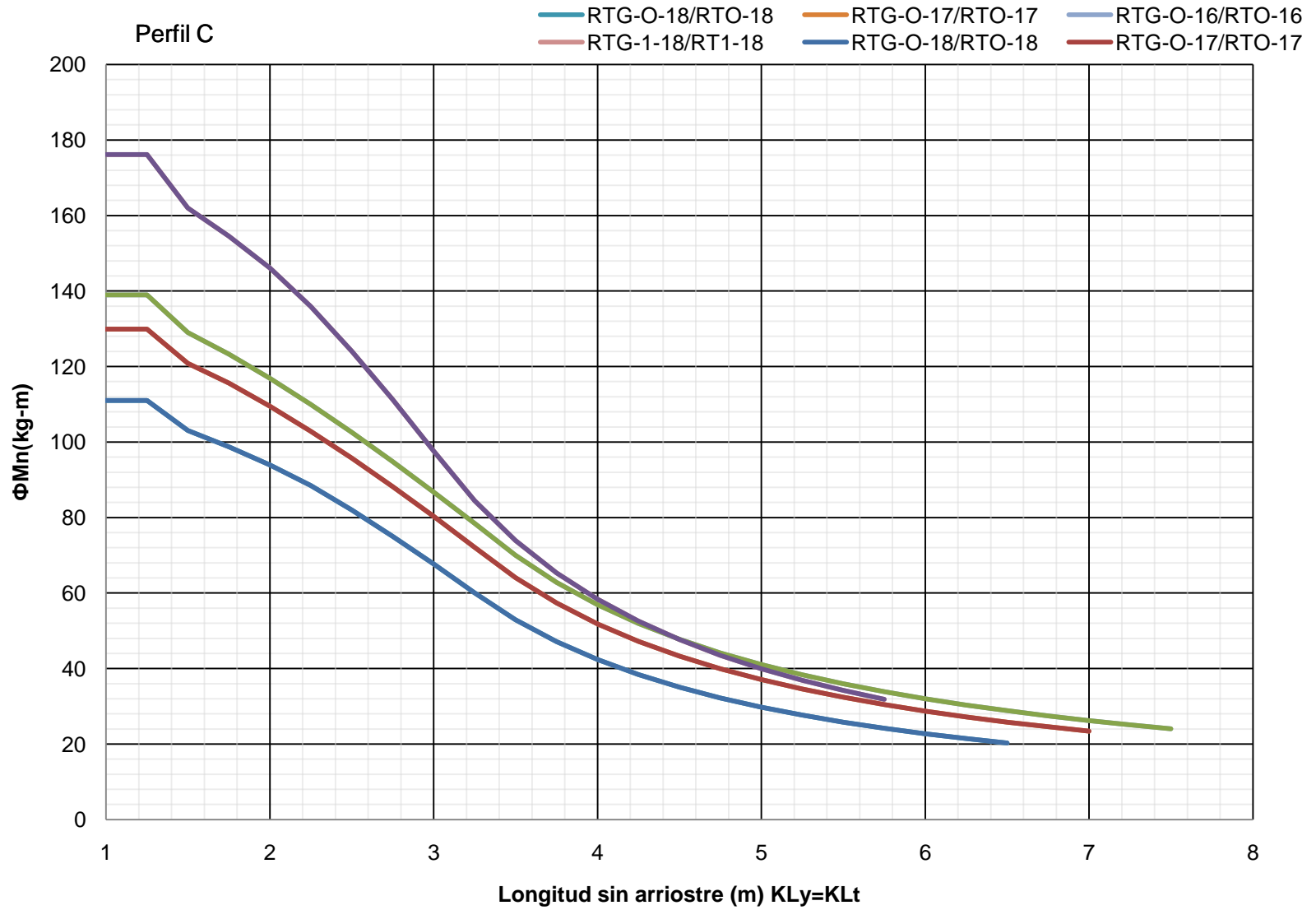
Perfil	RTG-4-14		RT1-13		RT1-11		RT3-16		RT3-13	
Fuente:	METALCO		METALCO		METALCO		METALCO		METALCO	
KL(m)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)
0.00	673.4	7641.4	336.2	9704.2	433.4	12774.6	382.8	5912.2	584.7	10681.8
0.25	673.4	7575.4	336.2	9569.3	433.4	12593.9	382.8	5865.0	584.7	10593.3
0.50	673.4	7381.2	336.2	9183.6	433.4	12087.0	382.8	5725.8	584.7	10332.1
0.75	673.4	7068.9	336.2	8599.0	433.4	11344.3	382.8	5501.2	584.7	9910.7
1.00	673.4	6654.7	336.2	7884.6	433.4	10475.8	382.8	5202.1	584.7	9348.9
1.25	636.1	6158.7	336.2	7110.8	433.4	9577.8	382.8	4841.8	584.7	8672.0
1.50	607.0	5604.1	309.3	6336.3	401.1	8716.8	347.0	4436.0	529.8	7908.5
1.75	572.5	5014.3	295.0	5602.4	384.7	7928.9	327.3	4000.9	500.8	7088.7
2.00	530.3	4412.0	279.4	4933.0	367.5	6901.7	305.0	3552.4	468.6	6242.0
2.25	483.4	3817.5	262.8	4338.3	349.6	5860.4	280.1	3105.0	433.5	5379.9
2.50	431.8	3245.5	245.5	3819.0	331.3	4874.3	252.8	2669.7	395.8	4444.3
2.75	375.8	2782.0	227.4	3199.3	312.8	4028.3	223.2	2275.1	356.0	3673.0
3.00	320.1	2415.4	209.0	2688.3	294.1	3384.9	191.9	1964.7	314.2	3086.3
3.25	275.9	2119.1	190.1	2290.6	275.3	2884.2	165.6	1715.2	274.9	2629.8
3.50	240.8	1875.4	171.2	1975.1	256.5	2486.9	144.6	1510.8	243.3	2267.5
3.75	212.4	1671.8	154.9	1720.5	237.7	2166.3	127.7	1335.0	217.8	1975.2
4.00	189.2	1496.8	141.3	1512.2	219.4	1904.0	113.8	1173.3	196.7	1736.1
4.25	169.9	1325.9	129.9	1339.5	203.3	1686.6	102.3	1039.4	179.1	1537.8
4.50	153.7	1182.6	120.2	1194.8	189.5	1504.4	92.6	927.1	164.2	1371.7
4.75	140.0	1061.4	111.8	1072.3	177.5	1350.2	84.4	832.1	151.5	1231.1
5.00	128.2	957.9	104.5	967.8	167.0	1218.6	77.3	750.9	140.5	1111.1
5.25	118.1	868.9	98.1	877.8	157.7	1105.3	71.3	681.1	131.0	1007.8
5.50		791.7	92.5	799.8	149.4	1007.1		620.6	122.6	918.2
5.75		724.3	87.5	731.8	141.9	921.4		567.8	115.3	840.1
6.00		665.2	83.0	672.1	135.2	846.2		521.5	108.7	771.6
6.25		613.1	78.9	619.4	129.1	779.9		480.6	102.9	711.1
6.50		566.8	75.3	572.7	123.5	721.0		444.3		657.4
6.75		525.6	71.9	531.0	118.4	668.6		412.0		609.6
7.00		488.7	68.9	493.8	113.7	621.7		383.1		566.9
7.25		455.6	66.1	460.3	109.4	579.6		357.2		528.5
7.50		425.7	63.5	430.1	105.4	541.6		333.7		493.8
7.75		398.7	61.2	402.8	101.7	507.2		312.6		462.5
8.00		374.2	59.0	378.0	98.3	476.0		293.3		434.0

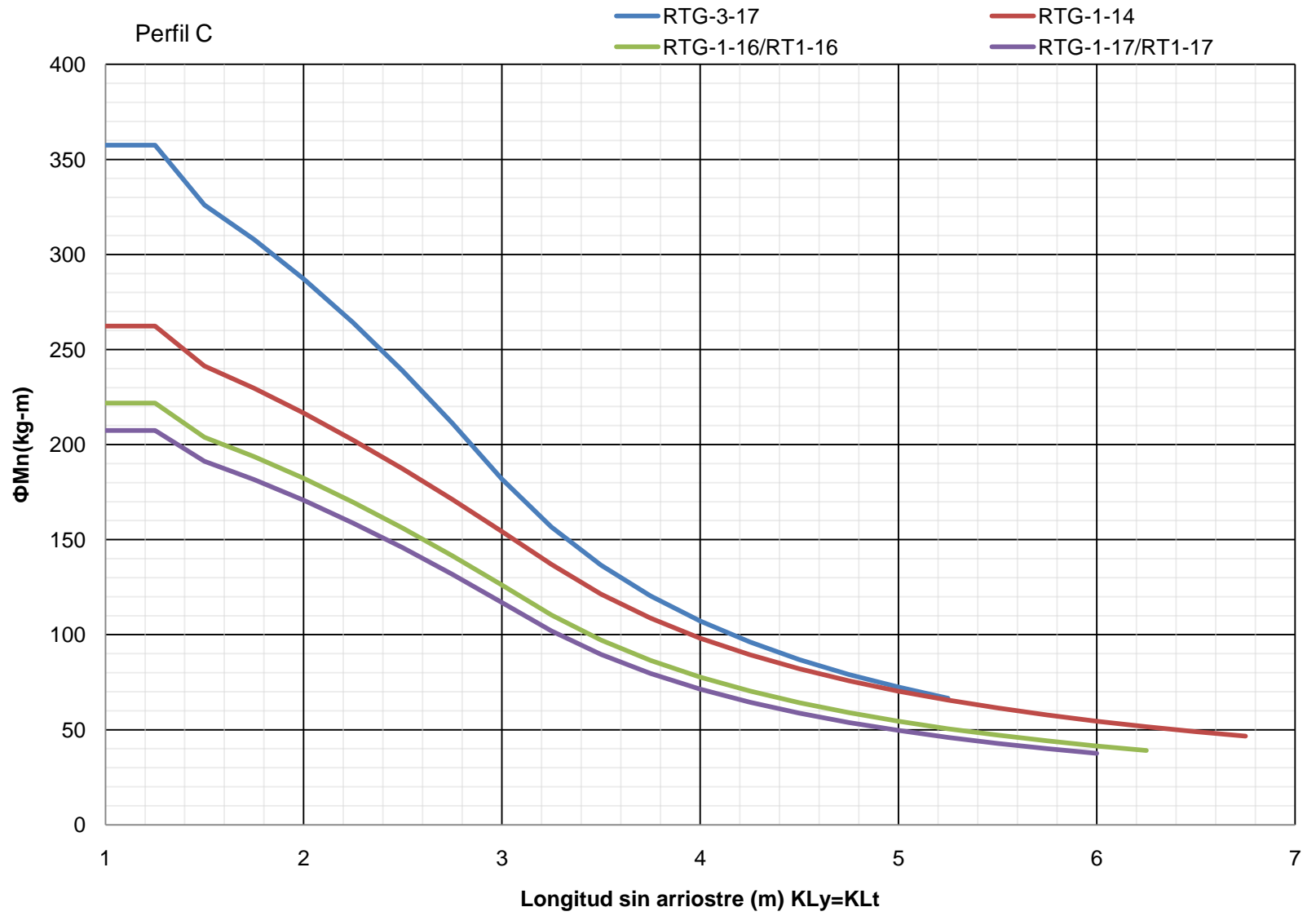
Resistencia al Momento y Compresión. (No se incluye Resistencia al Pandeo Distorsional). Preparadas por Geiner Oviedo.

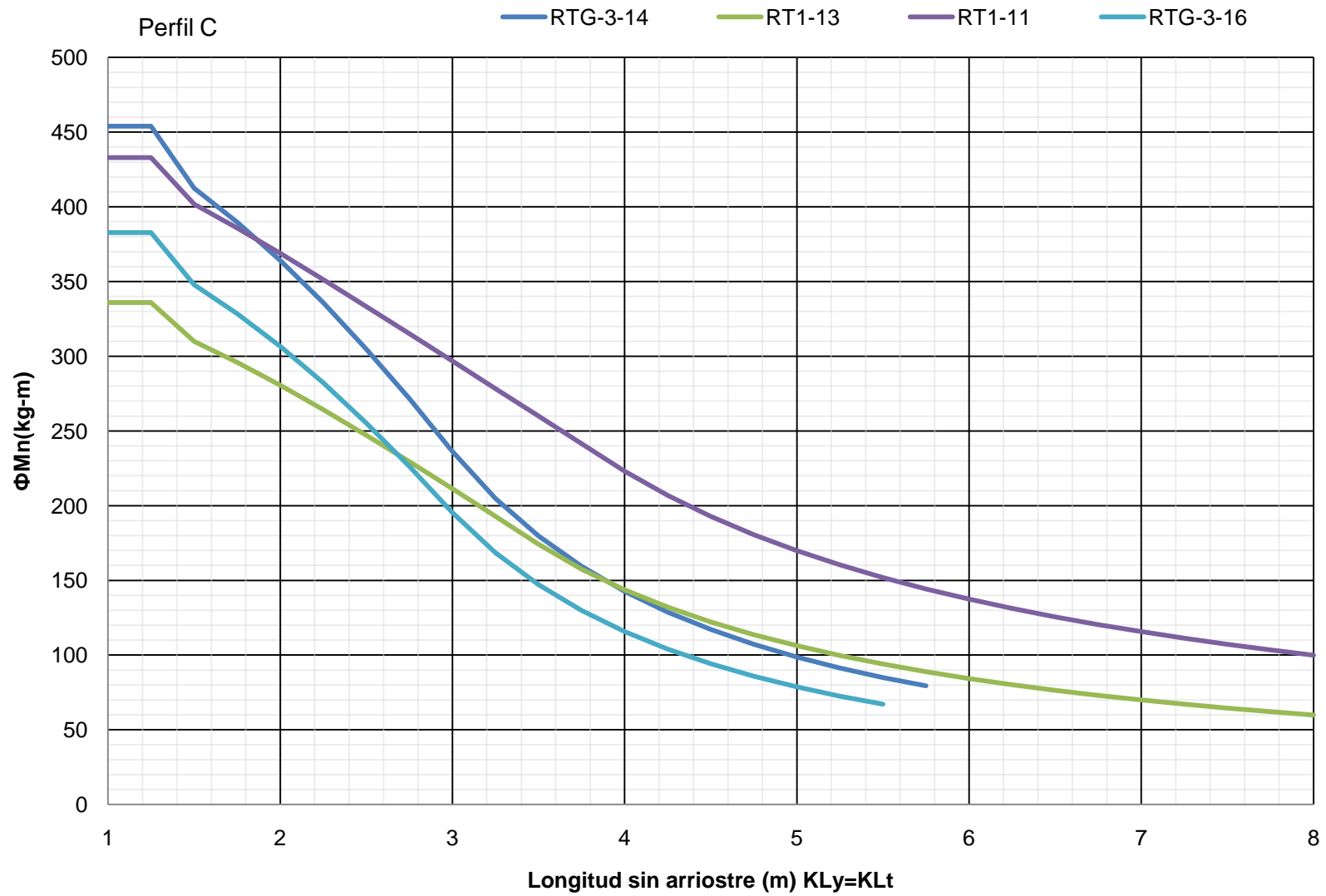
Perfil	RT4-16		RT4-14		RT4-11	
Fuente:	METALCO		METALCO		METALCO	
KL(m)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)	Mu (kg-m)	Pu (kg)
0.00	549.4	6005.3	877.1	11057.6	1145.3	16454.7
0.25	549.4	5953.7	877.1	10960.5	1145.3	16303.0
0.50	549.4	5801.5	877.1	10674.2	1145.3	15856.0
0.75	549.4	5556.9	877.1	10213.9	1145.3	15137.3
1.00	549.4	5232.5	877.1	9603.2	1145.3	14183.8
1.25	519.6	4844.2	827.0	8871.8	1077.9	13042.1
1.50	496.2	4410.2	786.1	8053.3	1025.0	11764.7
1.75	468.5	3949.0	738.7	7182.4	964.8	10405.3
2.00	436.7	3478.4	685.3	6292.1	898.1	9015.3
2.25	400.7	3014.5	626.3	5412.1	825.9	7512.4
2.50	360.5	2567.1	562.4	4573.3	748.9	6087.5
2.75	314.7	2200.8	493.8	3904.7	667.8	5031.0
3.00	267.0	1912.4	424.3	3355.2	584.0	4227.4
3.25	229.4	1680.3	368.3	2858.8	512.3	3602.1
3.50	199.5	1490.0	323.7	2465.0	455.0	3105.9
3.75	175.4	1331.7	287.7	2147.3	408.4	2705.5
4.00	155.7	1198.0	258.1	1887.3	369.9	2377.9
4.25	139.3	1084.0	233.4	1671.8	337.7	2106.4
4.50	125.5	985.6	212.6	1491.2	310.4	1878.9
4.75	113.9	900.0	195.0	1338.3	287.1	1686.3
5.00	103.9	816.4	179.8	1207.9	266.9	1521.9
5.25		740.5	166.7	1095.6	249.4	1380.4
5.50		674.7	155.3	998.2	233.9	1257.7
5.75		617.3		913.3	220.3	1150.8
6.00		566.9		838.8	208.2	1056.9
6.25		522.5		773.0		974.0
6.50		483.1		714.7		900.5
6.75		448.0		662.7		835.0
7.00		416.5		616.3		776.5
7.25		388.3		574.5		723.8
7.50		362.8		536.8		676.4
7.75		339.8		502.8		633.5
8.00		318.9		471.8		594.5

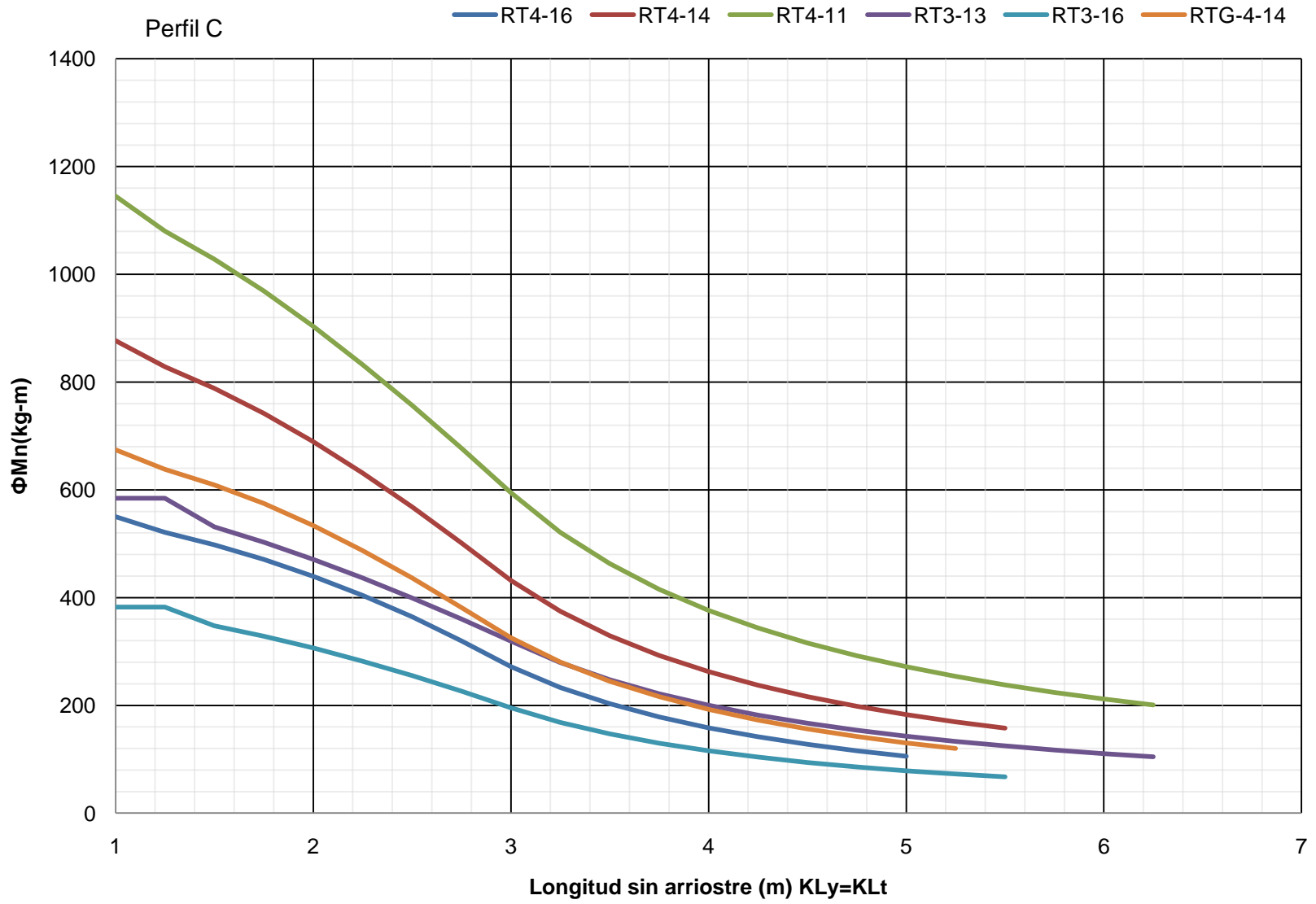
Resistencia al Pandeo Distorsional $k_{\phi} = 0$				
Perfil	Flexión		Compresión	
	Mu(kg-m)	Lcr(m)	Pu (kg)	Lcr(m)
RTG-O-18/RTO-18	106.86	0.40	3898.36	0.44
RTG-O-17/RTO-17	123.64	0.36	4729.23	0.40
RTG-O-16/RTO-16	131.69	0.35	5140.03	0.39
RTG-1-18/RT1-18	161.86	0.43	4127.90	0.48
RTG-1-17/RT1-17	196.12	0.40	5076.98	0.44
RTG-1-16/RT1-16	210.29	0.38	5557.61	0.42
RTG-1-14	248.73	0.35	7001.65	0.38
RTG-3-17	315.73	0.44	5127.66	0.49
RTG-3-16	345.06	0.42	5659.36	0.47
RTG-3-14	430.22	0.38	7315.35	0.42
RTG-4-14	610.00	0.41	6815.19	0.46
RT1-13	318.53	0.30	9620.81	0.33
RT1-11	410.62	0.25	12774.61	0.28
RT3-16	345.06	0.42	5659.36	0.47
RT3-13	554.06	0.33	10618.15	0.36
RT4-16	479.30	0.46	5190.90	0.50
RT4-14	831.14	0.35	10205.06	0.39
RT4-11	1085.32	0.30	15493.32	0.33

Resistencia al Cortante y a la Tensión		
Perfil C	V _u (kg)	T _u (kg)
RTG-O-18/RTO-18	880	4595
RTG-O-17/RTO-17	1019	5332
RTG-O-16/RTO-16	1088	5698
RTG-1-18/RT1-18	1314	5345
RTG-1-17/RT1-17	1573	6207
RTG-1-16/RT1-16	1682	6635
RTG-1-14	2004	7908
RTG-3-17	1789	7665
RTG-3-16	2053	8197
RTG-3-14	2957	9782
RTG-4-14	2957	11657
RT1-13	2603	10275
RT1-11	3424	13526
RT3-16	2053	8197
RT3-13	4166	12743
RT4-16	1735	9759
RT4-14	5126	15211
RT4-11	7619	20149




















TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO, Geiner Oviedo.

Tubo	Fuente	Mu(kg-m)	Lu(kg-m)	Vu (kg)	Tu (kg)
50x50x1.2	Metalco	78.4	19.3	1355	4750
50x50x1.5	Metalco	95.1	19.4	1622	5859
50x50x1.8	Metalco	110.7	19.6	1861	6938
72x72x1.2	Metalco	149.3	27.6	2051	6949
72x72x1.5	Metalco	200.1	27.8	2493	8608
72x72x1.8	Metalco	242.6	27.9	2906	10237
92x92x1.2	Metalco	223.3	35.2	2628	8948
92x92x1.5	Metalco	302.5	35.3	3284	11108
92x92x1.8	Metalco	385.1	35.4	3856	13236
TC 32-18	Tubotico	30.0	12.5	785	2950
TC 32-14	Tubotico	40.8	12.8	1007	4239
TC 38-18	Tubotico	43.6	14.8	975	3550
TC 38-16	Tubotico	54.5	15.0	1189	4570
TC 38-14	Tubotico	60.3	15.1	1292	5138
TC 38-13	Tubotico	73.5	15.4	1489	6555
TC 50-16	Tubotico	99.4	19.5	1689	6150
TC 50-14	Tubotico	110.7	19.6	1861	6938
TC 50-13	Tubotico	137.9	19.8	2243	8935
TC 50-11	Tubotico	168.8	20.2	2591	11467
TC 72-16	Tubotico	213.6	27.8	2606	9046
TC 72-14	Tubotico	242.6	27.9	2906	10237
TC 72-13	Tubotico	308.1	28.1	3624	13297
TC 72-11	Tubotico	387.9	28.4	4431	17277
TC 91-16	Tubotico	318.5	35.0	3398	11547
TC 91-14	Tubotico	378.0	35.0	3808	13086
TC 100-16	Tubotico	372.3	38.4	3773	12731
TC 100-14	Tubotico	443.3	38.4	4236	14436
TC 100-13	Tubotico	622.5	38.7	5382	18848
TC 100-11	Tubotico	797.1	39.0	6772	24672
TC 100-07	Tubotico	1102.9	39.7	8971	35739
TC 125-13	Tubotico	932.3	48.1	6952	23805
TC 125-11	Tubotico	1285.6	48.4	8863	31274
TC 125-07	Tubotico	1810.4	49.0	12110	45652
TC 150-13	Tubotico	1263.8	57.6	8522	28762
TC 150-11	Tubotico	1842.3	57.8	10954	37877
TC 150-07	Tubotico	2692.6	58.4	15250	55566

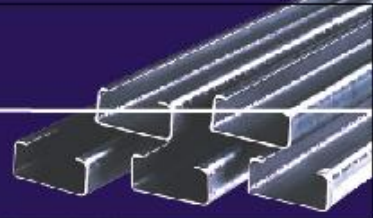
TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO, Geiner Oviedo.					
Tubo	Fuente	Mu(kg-m)	Lu(m)	Vu (kg)	Tu (kg)
1 1/2" X 1 1/2" X 1/8	Aceros Roag	122.8	11.4	2228	11640
2" X 2" X 2 MM	Aceros Roag	174.3	14.3	2859	10854
2" X 2" X 1/8	Aceros Roag	244.9	14.7	3714	16331
2" X 2" X 1/4	Aceros Roag	332.1	18.0	1486	26786
2 1/2" X 2 1/2" X 1/4	Aceros Roag	597.4	20.4	4457	36168
2 1/2" X 2 1/2" X 2MM	Aceros Roag	419.1	21.1	4730	16765
3" X 3" X 2 MM	Aceros Roag	615.2	21.5	6685	25713
3" X 3" X 1/8	Aceros Roag	549.0	24.6	5666	19720
3 1/2" X 3 1/2" X 2MM	Aceros Roag	863.4	24.9	8170	30404
3 1/2" X 3 1/2" X 1/8	Aceros Roag	688.2	28.0	6602	22675
4" X 4" X 2 MM	Aceros Roag	1153.4	28.3	9656	35095
4" X 4" X 1/8	Aceros Roag	1596.7	28.8	12813	50818
4" X 4" X 3/16	Aceros Roag	1828.9	35.2	12627	44478
5" X 5" X 3/16	Aceros Roag	2618.9	35.6	17269	64891
5" X 5" X 1/4	Aceros Roag	3206.8	36.6	19312	83080
6" X 6" X 3/16	Aceros Roag	3892.9	42.5	21726	78965
6" X 6" X 1/4	Aceros Roag	4841.4	43.4	25254	101844
8" X 8" X 1/4	Aceros Roag	9118.8	57.0	37138	139373
10" X 10" X 1/4	Aceros Roag	14630.0	70.7	49022	176902

Condición de Apoyo	(a) 	(b) 	(c) 	(d) 	(e) 	(f) 
<i>K</i> teórico	0.5	0.7	1.0	2.0	2.0	2.0
<i>K</i> recomendado o de diseño	0.7	8.0	1.2	1.0	2.1	2.0
Simbología de los Apoyos	 <ul style="list-style-type: none">  Empotrado  Rotación libre, impedido de translación  Rotación Impedida, libre translación  Libre Rotación, translación libre. 					

Anexos

Se anexan las especificaciones de perfiles encontrados en el mercado nacional.

Perfil Estructural Tipo "C" Galvanizado



Ventajas

- Protección contra la corrosión, gracias a su recubrimiento de zinc.
- Producto funcional, fácil de instalar.
- Flexibilidad y versatilidad en el diseño
- Menos mano de obra para instalación.
- Estructura de soporte más liviana.
- Compatibles con cualquier material o sistema constructivo.
- Secciones económicas con alta resistencia y bajo peso.

Presentaciones del Producto

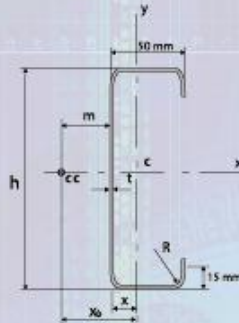
- Radio Interno: R=6mm
- Largo de perfil: 6mts.
- Recubrimiento de zinc: 275 g/m2

Especificaciones Técnicas

- 1. Norma de acero: ASTM A 366 (JIS G 3141)
- 2. Norma de galvanización: ASTM A 653

Propiedades del Acero

- Límite de fluencia mínimo del acero virgen: $F_y = 227 \text{ MPa}$
- Esfuerzo último mínimo del acero virgen: $F_u = 340 \text{ MPa}$
- Módulo de elasticidad: $E = 200 \text{ GPa}$
- Módulo de rigidez: $G = 77 \text{ GPa}$



CC - centro de cortante
C - centroide de la sección
R prom - 6 mm

Perfil	h cm	t cm	A cm ²	Eje x			Eje y			x cm	m cm	J cm ⁴	C _w cm ²	j cm	r _o cm	-x _c cm
				I _x cm ⁴	S _x cm ³	r _x cm	I _y cm ⁴	min S _y cm ³	r _y cm							
RTG O-18	7	0.120	2.22	18.0	5.15	2.86	7.80	2.57	1.88	1.969	2.666	0.0106	114.0	5.61	5.71	4.58
RTG O-17	7	0.140	2.58	21.0	6.00	2.85	9.08	2.93	1.88	1.902	2.879	0.0168	126.3	6.44	5.88	4.78
RTG O-16	7	0.150	2.74	22.1	6.33	2.84	9.52	3.14	1.87	1.968	2.646	0.0205	137.5	5.58	5.67	4.54
RTG 1-18	10	0.120	2.58	41.0	8.20	4.00	8.92	2.71	1.87	1.701	2.469	0.0123	221.0	6.34	6.03	4.11
RTG 1-17	10	0.140	3.00	47.8	5.56	3.99	10.38	3.09	1.86	1.635	2.643	0.0196	245.4	7.35	6.14	4.28
RTG 1-16	10	0.150	3.19	50.5	10.10	3.98	10.91	3.31	1.85	1.701	2.450	0.0239	268.6	6.32	5.99	4.08
RTG 1-14	10	0.180	3.83	60.5	12.09	3.98	13.00	3.84	1.84	1.616	2.617	0.0413	303.7	7.31	6.09	4.23
RTG 3-17	15	0.140	3.68	122.4	16.32	5.76	11.77	3.26	1.78	1.391	2.188	0.0295	523.1	8.02	6.97	3.48
RTG 3-16	15	0.150	3.94	130.6	17.42	5.76	12.51	3.47	1.78	1.391	2.188	0.0295	623.8	8.65	6.97	3.50
RTG 3-14	15	0.180	4.73	156.6	20.88	5.76	14.90	4.04	1.78	1.308	2.311	0.0510	709.0	9.94	7.03	3.62
RTG 4-14	20	0.180	5.93	311.8	31.18	7.45	16.20	4.15	1.70	1.099	2.083	0.0607	1,339.7	13.89	8.27	3.18

donde:

A = área de la sección.

C_w = constante del alabeo de la sección.

J = constante de la torsión de la sección (constante de St. Venant).

j = parámetro para determinar momento elástico crítico de la sección.

r_x = radio del giro de la sección con respecto al eje x.

r_y = radio del giro de la sección con respecto al eje y.

r_o = radio del giro polar con respecto al centro del cortante de la sección.

I_x = momento de inercia de la sección con respecto al eje x.

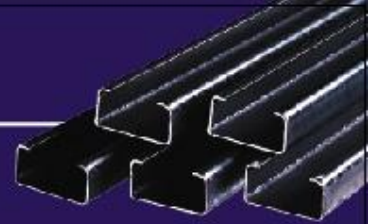
I_y = momento de inercia de la sección con respecto al eje y.

S_x = módulo elástico de la sección con respecto al eje x.

min S_y = módulo elástico mínimo de la sección con respecto al eje y.

Nota: calculado según las expresiones dadas en el manual de AISI.

Perfil Estructural Tipo "C" Hierro Negro



Ventajas

- Producto funcional, fácil de instalar.
- Flexibilidad y versatilidad en el diseño.
- Menos mano de obra para instalación.
- Estructura de soporte más liviana.
- Compatibles con cualquier material o sistema constructivo.
- Secciones económicas con alta resistencia y bajo peso.

Usos y Aplicaciones

- Vigas
- Cerchas.
- Columnas.
- Viguetas de Entrepiso
- Otros usos.

Comportamiento del Producto

Perfil	LÍMITE DE FLUENCIA INCREMENTADO	
	COMPRESIÓN [MPa]	FLEXIÓN [MPa]
RT0-18	244*	255*
RT0-17	246*	258*
RT0-16	248*	261
RT1-18	242*	255*
RT1-17	244*	257*
RT1-16	245*	261
RT1-13	254	277
RT1-11	261	291
RT3-16	242*	261*
RT3-13	249*	277
RT4-16	239*	261*
RT4-13	245*	277
RT4-11	250*	291

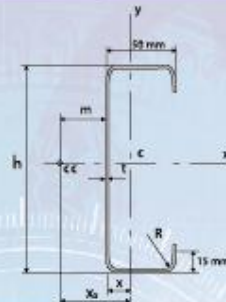
* NOTA: No debe usarse debido a que el factor de reducción es menor a uno, Usar $F_y = 227 \text{ Mpa}$

Propiedades:

- Límite de fluencia mínimo del Acero Virgen: $F_y = 227 \text{ MPa}$
- Esfuerzo último mínimo del Acero Virgen: $F_u = 340 \text{ MPa}$
- Módulo de Elasticidad: $E = 200 \text{ GPa}$
- Módulo de Rigidez: $G = 77 \text{ GPa}$

Especificaciones Técnicas

- Norma de acero: ASTM A-570 (JIS G 3132 SPHT 1 y 2).
- Largo estándar del perfil: 6m.



CC - centro de cortante
C - centroide de la sección
R prom - 6 mm

Perfil	h cm	t cm	A cm ²	Eje x			Eje y			x cm	m cm	J cm ⁴	C _w cm ³	j cm	r _o cm	-x _o cm
				I _x cm ⁴	S _x cm ³	r _x cm	I _y cm ⁴	S _y cm ³	r _y cm							
RT0-18	7	0.120	2.22	18.2	5.20	2.82	7.88	2.55	1.89	1.912	2.893	0.0106	110.6	6.46	5.90	4.81
RT0-17	7	0.140	2.56	21.0	6.00	2.85	8.06	2.93	1.88	1.902	2.879	0.0169	126.3	6.44	5.88	4.78
RT0-16	7	0.150	2.74	22.1	6.33	2.84	8.52	3.14	1.87	1.905	2.646	0.0205	137.5	5.58	5.57	4.54
RT1-18	10	0.120	2.58	41.8	8.26	4.00	9.02	2.69	1.87	1.645	2.657	0.0124	214.3	7.38	6.17	4.30
RT1-17	10	0.140	3.00	47.8	9.56	3.99	10.38	3.09	1.86	1.635	2.643	0.0196	245.4	7.35	6.14	4.28
RT1-16	10	0.150	3.19	50.5	10.10	3.98	10.91	3.31	1.85	1.701	2.450	0.0239	268.6	6.32	5.99	4.08
RT1-13	10	0.237	4.93	79.5	15.30	3.94	16.13	4.89	1.81	1.699	2.393	0.0924	390.8	6.28	5.88	3.97
RT1-11	10	0.318	6.50	98.6	19.72	3.90	20.31	6.15	1.77	1.696	2.340	0.2189	485.1	6.24	5.78	3.88
RT3-16	15	0.150	3.94	130.6	17.42	6.76	12.51	3.47	1.78	1.391	2.188	0.0286	623.8	8.65	6.97	3.50
RT3-13	15	0.237	6.12	198.6	26.61	5.71	18.51	5.13	1.74	1.393	2.134	0.1146	917.0	8.69	6.87	3.41
RT4-16	20	0.150	4.89	250.0	26.30	7.45	13.60	3.56	1.70	1.190	1.884	0.0301	1171.6	12.29	8.24	3.08
RT4-13	20	0.237	7.30	399.2	39.92	7.39	20.13	5.28	1.66	1.186	1.932	0.1368	1730.9	12.46	8.15	3.00
RT4-11	20	0.318	9.66	621.3	52.13	7.34	26.36	6.66	1.62	1.182	1.884	0.3261	2179.6	12.64	8.06	2.92

donde:

A = área de la sección

C_w = constante del alabeo de la sección

J = constante de la torsión de la sección (constante de St Venant)

j = parámetro para determinar momento elástico crítico de la sección

r_x = radio del giro de la sección con respecto al eje x

r_y = radio del giro de la sección con respecto al eje y

r_o = radio del giro polar con respecto al centro del cortante de la sección

I_x = momento de inercia de la sección con respecto al eje x

I_y = momento de inercia de la sección con respecto al eje y

S_x = módulo elástico de la sección con respecto al eje x

minS_y = módulo elástico mínimo de la sección con respecto al eje y

Nota: calculado según las expresiones dadas en el manual de AISI.

Tubo Estructural Hierro Negro y Acero Galvanizado



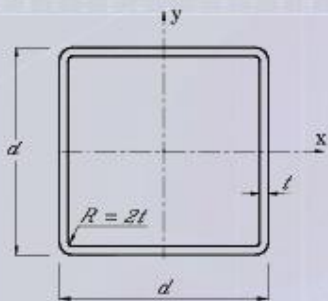
Ventajas

- Producto de alta calidad.
- Alta resistencia estructural.
- No necesita soldadura para hacer "cajas".
- Más rápido de instalar.
- Más económico y liviano.
- Rapidez en la construcción.

Presentaciones del Producto

- Hierro Negro.
- Acero Galvanizado.

Especificaciones Técnicas



Propiedades geométricas de las secciones

Sección mm	d cm	t cm	A cm ²	I _x = I _y cm ⁴	S _x = S _y cm ³	r _x = r _y cm
50x50x1.2	5.0	0.12	2.280	8.92	3.57	1.98
50x50x1.5	5.0	0.15	2.810	10.82	4.33	1.96
50x50x1.8	5.0	0.18	3.330	12.60	5.04	1.94
72x72x1.2	7.2	0.12	3.340	27.60	7.67	2.88
72x72x1.5	7.2	0.15	4.130	33.80	9.39	2.86
72x72x1.8	7.2	0.18	4.915	39.75	11.04	2.84
92x92x1.2	9.2	0.12	4.300	58.60	12.74	3.69
92x92x1.5	9.2	0.15	5.330	72.10	15.67	3.68
92x92x1.8	9.2	0.18	6.355	85.17	18.52	3.66

Donde:

- A= Área de la sección.
- I_x, I_y= Momentos de inercia de la sección con respecto a los ejes x y y, respectivamente.
- S_x, S_y= Módulos elásticos de la sección con respecto a los ejes x y y, respectivamente.
- r_x, r_y= Radios del giro de la sección con respecto a los ejes x y y, respectivamente.
- Utilizar límite de fluencia F_{ya}, según la sección A7.2 de AISI con F_{xt}= 227Mpa.

Capacidad Nominal en Tracción, T_n (según la Sección C2 de AISI)

Sección mm	d cm	t cm	A cm ²	F _{ya} MPa	T _n kN
50x50x1.2	5.0	0.12	2.280	239	51.75
50x50x1.5	5.0	0.15	2.810	242	64.65
50x50x1.8	5.0	0.18	3.330	245	77.53
72x72x1.2	7.2	0.12	3.340	237	79.00
72x72x1.5	7.2	0.15	4.130	239	98.90
72x72x1.8	7.2	0.18	4.915	242	111.78
92x92x1.2	9.2	0.12	4.300	235	100.80
92x92x1.5	9.2	0.15	5.330	236	126.10
92x92x1.8	9.2	0.18	6.355	238	142.90

Donde:

- d = peralte de la sección
- t = espesor de los perfiles
- A = área de la sección
- F_{ya} = límite de fluencia incrementado para la tracción
- T_n = Tracción Nominal, Debe modificarse con el Factor de Seguridad, Ω = 1.67, o con el Factor de Resistencia, Φ = 0.95, según el método de diseño que se está usando.

Capacidades Nominales de las Secciones para la flexión

Sección mm	f MPa	Yc cm	I _{xe} cm ⁴	S _{xe} cm ³	M _{nx} kNm	V _n kN
50x50x1.2	227	2.5	8.92	3.57	0.84	14.02
50x50x1.5	227	2.5	10.82	4.33	1.04	16.79
50x50x1.8	227	2.5	12.60	5.04	1.23	19.27
72x72x1.2	227	3.4	25.60	8.61	1.55	21.20
72x72x1.5	227	3.6	33.20	9.12	2.07	25.70
72x72x1.8	227	3.6	39.75	11.04	2.61	30.80
92x92x1.2	227	4.2	58.60	10.19	2.31	27.70
92x92x1.5	227	4.2	66.60	13.80	3.13	33.90
92x92x1.8	227	4.6	82.63	17.62	3.81	39.91

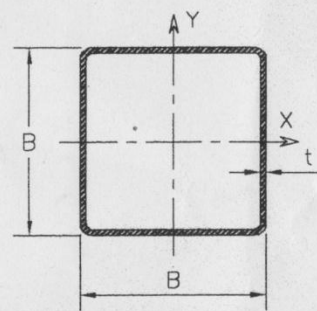
Donde:

- f = esfuerzo máximo en la sección (límite de fluencia incrementado para la flexión donde se permite o límite de fluencia del acero virgen).
- I_{xe} = momento de inercia de la sección efectiva con respecto al eje x.
- M_{nx} = Momento Nominal de la sección para la flexión alrededor del eje x centroidal con el esfuerzo máximo f. Debe modificarse con el Factor de Seguridad ó con el Factor de Resistencia; usando el Método de Esfuerzos de Trabajo (ASD) se divide con el Factor de Seguridad: W_b = 1.67, usando el Método de Esfuerzos Últimos (LRFD) se multiplica con el Factor de Resistencia: F_b = 0.95.
- S_{xe} = módulo mínimo efectivo de la sección para la flexión alrededor del eje x.
- V_n = Fuerza Cortante Nominal (con F_y = 227 MPa). Debe modificarse con el Factor de Seguridad, W_v, o con el Factor de Resistencia, F_v, indicados en la Tabla 3 y según el método de diseño que se está usando.
- y_c = posición del eje neutro, eje x.



TUBO CUADRADO ESTRUCTURAL

Tipo de Perfil	Dimensiones		Peso (Kg/m)	Area A (cm ²)	St Venant J (cm ⁴)	Momento de Inercia I (cm ⁴)	Módulo de Sección S (cm ³)	Radio de Giro r (cm)
	t (mm)	B (mm)						
TC 14-18'	1.20	14.00	0.57	0.55	0.25	0.14	0.20	0.50
TC 19-18'	1.20	19.00	0.72	0.79	0.69	0.40	0.42	0.71
TC 25-18'	1.20	25.00	0.99	1.08	1.66	0.98	0.79	0.95
TC 25-16'	1.58	25.00	1.28	1.31	2.00	1.15	0.92	0.94
TC 25-14'	1.80	25.00	1.36	1.53	2.30	1.29	1.03	0.92
TC 32-18'	1.20	32.00	1.17	1.42	3.60	2.18	1.36	1.24
TC 32-14'	1.80	32.00	1.66	2.04	5.10	2.96	1.85	1.21
TC 38-18	1.20	38.00	1.48	1.71	6.13	3.77	1.98	1.49
TC 38-16	1.58	38.00	1.79	2.09	7.49	4.52	2.38	1.47
TC 38-14	1.80	38.00	2.10	2.47	8.78	5.20	2.74	1.45
TC 38-13	2.38	38.00	2.47	3.15	11.04	6.32	3.33	1.42
TC 50-16	1.58 ^g	50.00	2.38	2.95	18.38	11.30	4.52	1.96
TC 50-14	1.80 ^g	50.00	2.82	3.30	20.73	12.34	4.94	1.94
TC 50-13	2.38	50.00	3.63	4.29	26.43	15.64	6.26	1.91
TC 50-11	3.17	50.00	4.93	5.51	33.40	19.09	7.64	1.86
TC 72-16	1.58 ^g	72.00	3.53	4.34	56.23	35.41	9.84	2.86
TC 72-14	1.80 ^g	72.00	4.13	4.88	63.79	39.24	10.90	2.84
TC 72-13	2.38	72.00	5.35	6.39	82.32	50.44	14.01	2.81
TC 72-11	3.17	72.00	7.15	8.38	106.07	64.58	17.94	2.78
TC 91-16	1.58 ^g	91.00	4.15	5.54	114.77	73.11	16.07	3.63
TC 91-14	1.80 ^g	91.00	5.01	6.28	130.01	82.31	18.09	3.62
TC 100-16	1.58 ^g	100.00	4.88	6.11	152.85	97.76	19.55	4.00
TC 100-14	1.80 ^g	100.00	5.57	6.90	173.79	109.26	21.85	3.98
TC 100-13	2.38	100.00	7.32	9.05	225.91	141.59	28.32	3.96
TC 100-11	3.17	100.00	9.88	11.93	293.95	183.42	36.68	3.92
TC 100-07	4.76	100.00	14.53	17.16	422.95	250.36	50.07	3.82
TC 125-13'	2.38	125.00	9.25	11.43	446.32	283.11	45.30	4.98
TC 125-11'	3.17	125.00	12.42	15.10	583.61	668.88	59.02	4.94
TC 125-07'	4.76	125.00	18.70	22.32	844.39	529.96	84.79	4.87
TC 150-13	2.38	150.00	11.12	13.81	776.93	496.82	66.24	6.00
TC 150-11	3.17	150.00	15.03	18.27	1019.18	649.82	86.64	5.96
TC 150-07	4.76	150.00	22.08	27.08	1484.36	940.89	125.45	5.89



SECCION TIPICA

NOTAS ADICIONALES:

(G) DISPONIBLE TAMBIEN EN GALVANIZADO

(*) DISPONIBLE SOLAMENTE CONTRA PEDIDO

LONGITUD ESTANDAR DE 6.00m - CONTRA PEDIDO
DESDE 4.00m HASTA 12.00m

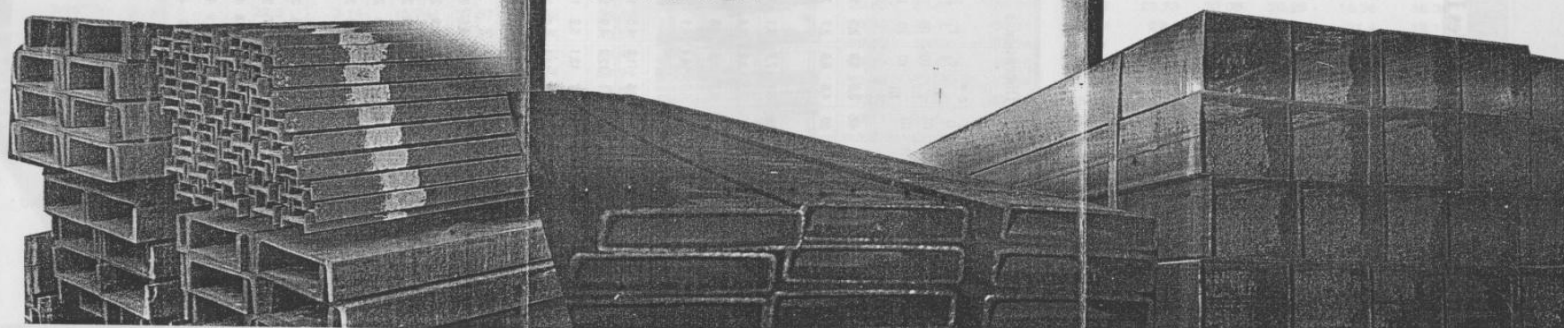
TIPO DE ACERO: JS-G3132 SPHT - 2

ESFUERZO DE FLUENCIA: 2310 kg/cm²

MODULO DE ELASTICIDAD: 2.1X10⁶ kg/cm²

ACEROS ROAG:

<h3>Tubo Estructural</h3> <p>Astm A-500 grado B</p> <h3>Formas</h3> <ul style="list-style-type: none">• Cuadrados• Rectangulares <h3>Detalles Técnicos</h3> <p>CARACTERISTICAS FISICAS</p> <ul style="list-style-type: none">• Resistencia a la tracción=400 MPa• Límite elástico=317 MPa• Alargamiento en 2"=23% <h3>Características Químicas</h3> <ul style="list-style-type: none">• Carbón Max= 0.30%• Fosforo Max= 0.05%• Azufre Max= 0.063%	<h2>MEDIDAS en existencia</h2> <table><thead><tr><th>CUADRADOS</th><th>RECTANGULARES</th></tr></thead><tbody><tr><td>1 1/2" X 1 1/2" X 1/8"</td><td>2" X 3" X 2 MM</td></tr><tr><td>2" X 2" X 2 MM</td><td>2" X 3" X 1/8"</td></tr><tr><td>2" x 2" x 1/8"</td><td>2" x 4" x 1/8"</td></tr><tr><td>2" x 2" x 1/4"</td><td>2" x 6" x 3/32"</td></tr><tr><td>2 1/2" x 2 1/2" x 1/4"</td><td>3" x 1 1/2" x 2 MM</td></tr><tr><td>3" x 3" x 2 MM</td><td>3" x 6" x 1/4"</td></tr><tr><td>3" x 3" x 1/8"</td><td>4" x 2" x 2 MM</td></tr><tr><td>3 1/2" x 3 1/2" x 2 MM</td><td>4" x 2" x 3/16"</td></tr><tr><td>3 1/2" x 3 1/2" x 1/8 MM</td><td>5" x 3" x 1/8"</td></tr><tr><td>4" x 4" x 2 MM</td><td>5" x 3" x 3/16"</td></tr><tr><td>4" x 4" x 1/8"</td><td>6" x 2" x 1/8"</td></tr><tr><td>4" x 4" x 3/16"</td><td>6" x 2" x 3/16"</td></tr><tr><td>5 x 5 x 1/8"</td><td>6" x 3" x 3/16"</td></tr><tr><td>5" x 5" x 3/16"</td><td>6" x 4" x 3/16"</td></tr><tr><td>5" x 5" x 1/4"</td><td>8" x 4" x 3/16"</td></tr><tr><td>6" x 6" x 3/16"</td><td></td></tr><tr><td>6" x 6" x 1/4"</td><td></td></tr><tr><td>8" x 8" x 1/4"</td><td></td></tr><tr><td>10" x 10" x 1/4"</td><td></td></tr></tbody></table>	CUADRADOS	RECTANGULARES	1 1/2" X 1 1/2" X 1/8"	2" X 3" X 2 MM	2" X 2" X 2 MM	2" X 3" X 1/8"	2" x 2" x 1/8"	2" x 4" x 1/8"	2" x 2" x 1/4"	2" x 6" x 3/32"	2 1/2" x 2 1/2" x 1/4"	3" x 1 1/2" x 2 MM	3" x 3" x 2 MM	3" x 6" x 1/4"	3" x 3" x 1/8"	4" x 2" x 2 MM	3 1/2" x 3 1/2" x 2 MM	4" x 2" x 3/16"	3 1/2" x 3 1/2" x 1/8 MM	5" x 3" x 1/8"	4" x 4" x 2 MM	5" x 3" x 3/16"	4" x 4" x 1/8"	6" x 2" x 1/8"	4" x 4" x 3/16"	6" x 2" x 3/16"	5 x 5 x 1/8"	6" x 3" x 3/16"	5" x 5" x 3/16"	6" x 4" x 3/16"	5" x 5" x 1/4"	8" x 4" x 3/16"	6" x 6" x 3/16"		6" x 6" x 1/4"		8" x 8" x 1/4"		10" x 10" x 1/4"		<h3>Ventajas</h3> <p><i>con Respecto a lo que Tradicionalmente se usa en nuestro país</i></p> <ol style="list-style-type: none">Mayor durabilidadAgradable apariencia estéticaMayor rapidez en construcciónSeguridad total en su estructuraEconomía en soldaduras, mano de obra, etc....
CUADRADOS	RECTANGULARES																																									
1 1/2" X 1 1/2" X 1/8"	2" X 3" X 2 MM																																									
2" X 2" X 2 MM	2" X 3" X 1/8"																																									
2" x 2" x 1/8"	2" x 4" x 1/8"																																									
2" x 2" x 1/4"	2" x 6" x 3/32"																																									
2 1/2" x 2 1/2" x 1/4"	3" x 1 1/2" x 2 MM																																									
3" x 3" x 2 MM	3" x 6" x 1/4"																																									
3" x 3" x 1/8"	4" x 2" x 2 MM																																									
3 1/2" x 3 1/2" x 2 MM	4" x 2" x 3/16"																																									
3 1/2" x 3 1/2" x 1/8 MM	5" x 3" x 1/8"																																									
4" x 4" x 2 MM	5" x 3" x 3/16"																																									
4" x 4" x 1/8"	6" x 2" x 1/8"																																									
4" x 4" x 3/16"	6" x 2" x 3/16"																																									
5 x 5 x 1/8"	6" x 3" x 3/16"																																									
5" x 5" x 3/16"	6" x 4" x 3/16"																																									
5" x 5" x 1/4"	8" x 4" x 3/16"																																									
6" x 6" x 3/16"																																										
6" x 6" x 1/4"																																										
8" x 8" x 1/4"																																										
10" x 10" x 1/4"																																										



Referencias

- American Iron and Steel Institute. 2007. **NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE COLD FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS.** Washington D.C.
- American Iron and Steel Institute. 2007. **COMMENTARY ON NORTH AMERICAN SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURAL MEMBERS.** Washington D.C.
- American Iron and Steel Institute. 2009. **MANUAL COLD-FORMED STEEL DESIGN.** Washington D.C.
- Hancock, G.; Murray, T.; Ellifrit, D. 2001. **COLD-FORMED STEEL STRUCTURES TO THE AISI SPECIFICATION.** New York: Editorial Marcel Dekker Inc.
- Appold, H. et al. 1985. **TECNOLOGÍA DE LOS METALES.** España: Editorial Reverte. No. 136-139.
- Vinnakota, S. 2006. **ESTRUCTURAS DE ACERO COMPORTAMIENTO Y LRFD.** México: Editorial Mc Graw-Hill Interamericana. No 28, 29, 126.
- Timoshenko, S. 1967. **RESISTENCIA DE MATERIALES.** España: Editorial Espasa. No. 228-234.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. 2003. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA.** Costa Rica: Editorial Tecnológica.
- Villón, M. 2005. **TRABAJANDO CON VISUAL BASIC 6.0.** Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Pallerola, J. 2007. **LAS MACROS EN MICROSOFT EXCEL.** México: Editorial Alfaomega.
- Romanjek, M. 2001. **PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE PERFILES ACERO LAMINADO EN FRÍO PRODUCIDOS EN COSTA RICA.** Tesis para obtener el grado de Magister Scientiae. Universidad de Costa Rica. 251p.
- Carranza, C. 2010. **PROCESOS DE FABRICACIÓN DE PERFILES LAMINADOS EN FRÍO DE METALCO.** Tibás, San José. Comunicación personal.