

# **Desarrollo de una herramienta de cálculo para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares para la empresa M. Cruz y Asociados LTDA.**

# ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

## CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

### Desarrollo de una herramienta de cálculo para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares, para la empresa M. Cruz y Asociados

Llevado a cabo por el estudiante:

Fallas Ureña Luis Justin

Carné: 2019043573

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el viernes 19 de enero de 2024 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

 Firmado digitalmente  
por JOSE ANDRES ARAYA  
OBANDO (FIRMA)  
Fecha: 2024.01.22  
14:03:37 -06'00'

---

Dr. Ing. Andrés Araya Obando  
Director de la Escuela

ANGEL  
HUMBERTO  
NAVARRO  
MORA (FIRMA)  
Firmado digitalmente  
por ANGEL  
HUMBERTO NAVARRO  
MORA (FIRMA)  
Fecha: 2024.01.22  
08:36:02 -06'00'

---

Ing. Ángel Navarro Mora, MSc.  
Profesor Guía

GUSTAVO  
ADOLFO ROJAS  
MOYA (FIRMA)  
Firmado digitalmente  
por GUSTAVO ADOLFO  
ROJAS MOYA (FIRMA)  
Fecha: 2024.01.22  
10:34:26 -06'00'

---

Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc.  
Profesor Lector

MILTON ANTONIO  
SANDOVAL  
QUIROS (FIRMA)  
Firmado digitalmente por  
MILTON ANTONIO  
SANDOVAL QUIROS (FIRMA)  
Fecha: 2024.01.19 10:20:05  
-06'00'

---

Ing. Milton Sandoval Quirós, MBA  
Profesor Observador

# Resumen

Se desarrolla un procedimiento estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares. Este trabajo se realizó debido a la necesidad de contar con un procedimiento actualizado y estandarizado por parte de la empresa M. Cruz y Asociados LTDA. Para eso, se realiza la compilación de datos necesarios para el diseño de estos elementos, se analizan los requerimientos que deben solventarse para llevar a cabo el proyecto con éxito y se elige la herramienta de cálculo más conveniente. Se desarrolla el procedimiento de cálculo en la herramienta seleccionada y se valida el procedimiento de diseño, mediante pruebas comparativas que involucran artículos científicos, fichas técnicas y cálculos manuales, así como software especializado en el cálculo de estructuras con materiales laminados en frío, como el software SAP 2000, con el objetivo de demostrar que el procedimiento estandarizado brinda resultados precisos y confiables.

Este procedimiento estandarizado utiliza tanto el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) como el método de *Resistencia Directa* para el diseño de los diferentes perfiles. Esto se realiza en conformidad con lo establecido en el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010/14) y en la especificación S100-16 del Instituto Americano de Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute, AISI).

Palabras clave: laminado en frío, procedimiento estandarizado, diseño estructural, método de Resistencia Directa.

# Abstract

A standardized procedure is developed for the design of cold-formed C, Z, and tubular profiles. This work was carried out due to the need to have an updated and standardized procedure by the company M.Cruz y Asociados LTDA. To achieve this, the necessary information for the design of these elements is compiled, the requirements that must be met to successfully carry out the project are analyzed, and the most suitable calculation tool is chosen. The calculation procedure is developed within the selected tool, and the design procedure is validated through comparative tests involving scientific articles, technical data sheets, manual calculations, as well as specialized software for the calculation of structures with cold-formed materials, such as SAP 2000 software, with the aim of demonstrating that the standardized procedure provides accurate and reliable results.

This standardized procedure employs both the Load and Resistance Factor Design (LRFD) method and the "Direct Strength" method for the design of the different profiles. This is done in accordance with the provisions of the Costa Rican Seismic Code (CSCR 2010/14) and the S100-16 specification of the American Iron and Steel Institute (AISI).

Keywords: cold-formed, standardized procedure, structural design, Direct Strength method.

# **Desarrollo de una herramienta de cálculo para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares para la empresa M. Cruz y Asociados LTDA.**

LUIS JUSTIN FALLAS UREÑA

Proyecto Final de Graduación (TFG) para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Enero del 2024

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

<b>Resumen ejecutivo</b> .....	<b>3</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>4</b>
<i>Objetivo general</i> .....	5
<i>Objetivos específicos</i> .....	5
<b>Capítulo 1: Marco teórico</b> .....	<b>6</b>
1.1 <i>Elementos estructurales laminados en frío</i> .....	6
1.2 <i>Código Sísmico de Costa Rica</i> .....	7
1.3 <i>Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI)</i> .....	7
1.4 <i>Pandeo en elementos laminados en frío</i> .....	9
1.4.1 <i>Pandeo local</i> .....	9
1.4.2 <i>Pandeo por distorsión</i> .....	11
1.4.3 <i>Pandeo lateral torsional</i> .....	13
1.4.4 <i>Pandeo global</i> .....	13
1.5 <i>Propiedades geométricas</i> .....	14
1.5.1 <i>Elementos tipo C</i> .....	14
1.5.2 <i>Elementos tipo Z</i> .....	17
1.5.3 <i>Elementos rectangulares</i> .....	20
1.6 <i>Diseño de elementos</i> .....	23
1.6.1 <i>Capacidad a tensión</i> .....	23
1.6.2 <i>Capacidad a compresión</i> .....	24
1.6.3 <i>Capacidad en flexión</i> .....	30
1.6.4 <i>Capacidad a cortante</i> .....	35
1.7 <i>Interacción de fuerzas</i> .....	39
1.7.1 <i>Combinación de carga axial y flexión</i> .....	39
1.7.2 <i>Combinación de flexión y cortante</i> .....	39
1.7.3 <i>Combinación de flexión y aplastamiento del alma</i> .....	39
1.8 <i>Incremento en el punto de fluencia</i> .....	40
<b>Capítulo 2: Metodología</b> .....	<b>41</b>
2.1 <i>Investigación</i> .....	41
2.2 <i>Desarrollo de la herramienta</i> .....	41
2.3 <i>Desarrollo de un modelo estructural</i> .....	42
2.4 <i>Guía de uso del procedimiento estandarizado</i> .....	44
<b>Capítulo 3: Resultados y análisis</b> .....	<b>45</b>

3.1 Resultados .....	45
3.1.1 Herramienta de cálculo .....	45
3.1.2 Propiedades geométricas de elementos tubulares .....	47
3.1.3 Propiedades geométricas de elementos tipo C .....	48
3.1.4 Propiedades geométricas de elementos tipo Z .....	50
3.1.5 Capacidad de elementos tubulares .....	52
3.1.6 Capacidad de elementos tipo C .....	53
3.1.7 Capacidad de elementos tipo Z .....	54
3.1.8 Interacción de fuerzas (D/C) .....	55
3.2 Análisis de resultados .....	58
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>60</b>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>60</i>
<i>Recomendaciones.....</i>	<i>60</i>
<b>Referencias .....</b>	<b>61</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>63</b>
<i>Apéndice 1. Guía de uso del procedimiento estandarizado. ....</i>	<i>63</i>
<i>Apéndice 2. Herramienta de cálculo.....</i>	<i>73</i>
Hoja: Entrada y Salida de Datos .....	73
Hoja: Hoja de Cálculo .....	76
Hoja: Resistencias Requeridas .....	86
Hoja: Perfiles .....	87
<i>Apéndice 3. Cálculo manual. ....</i>	<i>90</i>
<b>Anexos .....</b>	<b>93</b>
<i>Anexo 1. Resultados proporcionados por el software SAP 2000. ....</i>	<i>93</i>

# Resumen ejecutivo

Se desarrolla un procedimiento estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares. Este trabajo se desarrolla debido a la necesidad de contar con un procedimiento actualizado y estandarizado por la parte de la empresa M.Cruz y Asociados LTDA, una compañía especializada en el diseño de estructuras sismorresistentes, con más de 25 años de experiencia. El procedimiento desarrollado se ajusta a los lineamientos del Código Sísmicos de Costa Rica (CSCR 2010/16) y a la especificación S100-16 del Instituto Americano de Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute, AISI). En este procedimiento se utilizaron tanto el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) como el método de **Resistencia Directa** para el diseño de los diferentes perfiles.

Se espera que este documento sirva como un recurso adicional para la Escuela de Ingeniería en Construcción y proporcionar un complemento en la preparación de los estudiantes, dado que el tema en estudio no forma parte del currículo de la carrera.

Este proyecto adquiere relevancia en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, ya que busca promover la construcción de infraestructuras resistentes, sostenibles y de calidad para satisfacer las necesidades de la sociedad. Además, al tratarse de un procedimiento estandarizado, facilita el trabajo colaborativo entre los profesionales responsables del diseño de estructuras y fomenta la innovación y el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles.

Durante la ejecución de este trabajo, se realizó una investigación exhaustiva y una revisión de literatura técnica relacionada con el diseño de elementos estructurales laminados en frío (C, Z y tubulares). Luego, se desarrolló el procedimiento de cálculo mediante el software Excel. Por último, se validó el procedimiento de diseño, mediante pruebas comparativas que involucran artículos científicos, fichas técnicas y cálculos manuales, así como software especializado en el cálculo de estructuras con materiales laminados en frío. Para los resultados válidos, se observaron diferencias en la comparativa que son inferiores al 1%, por lo cual se determinó que el procedimiento de diseño estandarizado de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares, proporciona resultados precisos y confiables.

Adicionalmente, como parte integral del proyecto, se elaboró una guía de uso de la herramienta de diseño para facilitar la utilización del procedimiento de cálculo estandarizado. En esta guía se detalla el contenido de las cuatro hojas de cálculo que conforman cada uno de los procedimientos de diseño, así como la manera correcta de hacer uso de estas.

# Introducción

Este proyecto será desarrollado en la empresa M.Cruz & Asociados LTDA, una compañía especializada en el diseño de estructuras sismorresistentes, con más de 25 años de experiencia. Para el análisis y diseño de elementos laminados en frío, la empresa cuenta con hojas de cálculo electrónicas creadas para casos específicos. Sin embargo, muchas de estas no poseen un formato estandarizado y se realizaron con normativas anteriores a las vigentes a la fecha de realización de este trabajo, lo cual implica que, al utilizarlas el diseñador debe realizar correcciones conforme con los requisitos de cada proyecto.

Es debido a esta situación que surge la necesidad de implementar un procedimiento de cálculo actualizado y estandarizado para elementos laminados en frío, tales como perfiles C, Z y tubulares, con la finalidad de que los ingenieros de esta organización puedan diseñar estos elementos estructurales de manera más efectiva, y de acuerdo con un estándar que, además, le permita a estos trabajar de una manera más eficiente cuando se requiera de una labor colaborativa.

El proyecto es relevante en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, ya que contribuye directamente al Objetivo número 9: "Industria, Innovación e Infraestructura". Este objetivo busca promover la construcción de infraestructuras resistentes, sostenibles y de calidad, que permitan satisfacer las necesidades de la sociedad y promover el desarrollo económico, social y ambiental de las comunidades. Al desarrollar un sistema actualizado y estandarizado mediante una herramienta de software para el diseño de elementos estructurales, se promueve la creación de infraestructuras más fiables y resistentes, lo cual resulta clave para garantizar la seguridad de las personas. Además, al facilitar el trabajo colaborativo entre los ingenieros de la empresa, se promueve la innovación y el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles.

En el nivel nacional, el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) establece los requisitos mínimos de diseño de elementos estructurales. En este se encuentra el apartado 10.8 correspondiente a sistemas sismorresistentes con base en perfiles de acero laminado en frío con secciones esbeltas. Este código hace referencia a las disposiciones del Instituto Americano de Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute, AISI). En particular, destaca la especificación S100-2016, titulada "North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members", la cual es aplicable al diseño de miembros estructurales conformados en frío de un acero de bajo carbono o de baja aleación, con un espesor menor o igual a 2.54 centímetros. En cuanto a la determinación de las propiedades geométricas de los elementos laminados en frío, la AISI provee el "Cold-Formed Steel Design Manual, con la finalidad de facilitar el cálculo de estas propiedades".

En este proyecto se presentarán tres hojas de cálculo electrónicas, cada una adaptada a la geometría de los elementos, ya que los cálculos varían en función de las propiedades geométricas del elemento, las hojas desarrolladas son las siguientes:

1. Diseño de elementos tubulares.
2. Diseño de elementos tipo C.
3. Diseño de elementos tipo Z.

# Objetivo general

Implementar un procedimiento estandarizado para el diseño de elementos estructurales laminados en frío, para la empresa M.Cruz y Asociados LTDA.

## Objetivos específicos

1. Compilar la información necesaria para el diseño de elementos estructurales laminados en frío tales, como: perfiles C, Z y tubulares.
2. Implementar un procedimiento de cálculo mediante un software que permita el diseño estandarizado de elementos estructurales laminados en frío, tales como: perfiles C, Z y tubulares.
3. Validar el procedimiento de diseño estandarizado de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares, mediante pruebas comparativas con artículos científicos, cálculos realizados de forma manual, fichas técnicas y resultados de software especializado, asegurando la coherencia entre los resultados teóricos y prácticos para respaldar la robustez del procedimiento establecido.

# Capítulo 1: Marco teórico

## 1.1 Elementos estructurales laminados en frío

Según Wei-Wen Yu (2019),

los elementos laminados en frío son conformados a partir de láminas, tiras, placas o barras planas de acero utilizando máquinas plegadoras o perfiladoras. El espesor de la lámina o tira de acero que generalmente se usa para elementos laminados en frío varía entre 0.4 mm a 6.4 mm. Elementos conformados en frío pueden formarse exitosamente con placas y barras de hasta 25 mm (p.1).

Monge, D. y Vindas, R. (2002), en su tesis de licenciatura, describen el proceso de fabricación de un perfil doblado o conformado en frío. Este proceso consiste en pasar una placa de acero a través de una serie de rodillos que gradualmente le confieren el espesor final deseado para la lámina de acero. Todo este procedimiento se lleva a cabo en frío, y la lámina resultante se enrolla en bobinas. Según Oviedo, A. (2010), una vez obtenidas las bobinas de acero con un espesor definido, se hacen pasar por un sistema cuyo propósito es eliminar impurezas del acero. Opcionalmente, las láminas de acero pueden ser sumergidas en zinc fundido para brindarle un galvanizado al material. Una vez el material está preparado se corta longitudinalmente según el tipo de perfil que se desea laminar. Las láminas cortadas son conducidas a través de un conjunto de rodillos con un diámetro definido, donde se dobla el acero de acuerdo con la forma deseada. Es importante destacar que este proceso se lleva a cabo completamente en frío. En el caso de los tubos estructurales, los rodillos dan forma a una configuración circular sobre la cual se aplica una soldadura continua para cerrar el perfil. Posteriormente, otro conjunto de rodillos moldea el perfil en forma cuadrada o rectangular, por último, se cortan los perfiles según una longitud dada.

En Costa Rica existen grandes proveedores en lo respecta a elementos laminados en frío. Entre ellos, se descarta la empresa Metalco y la empresa Ferromax, estas ofrecen variedad de perfiles con espesores que van desde los 0.7 m.m. hasta los 4.75 m.m.

## 1.2 Código Sísmico de Costa Rica

Según el Código Sísmico de Costa Rica 2010, en su revisión de 2014 (CSCR 2010/14), las estructuras con elementos sismorresistentes basados en perfiles de acero laminado en frío, caracterizados por sus secciones esbeltas, deben ser diseñadas mediante el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD). Es necesario cumplir con los requisitos pertinentes establecidos en las especificaciones del Instituto Americano de Hierro y Acero (American Iron and Steel Institute, AISI).

El CSCR 2010/14 establece que:

los sistemas a base de perfiles de acero laminado en frío ya sean marcos con uniones resistentes a momento o marcos arriostrados con uniones que no hayan sido probadas experimentalmente (tipo NP), o marcos con uniones resistentes a momento o marcos arriostrados con uniones que hayan sido probadas (tipo P), pueden emplearse exclusivamente en edificaciones de uno o dos niveles. Además, estas edificaciones deben tener una altura máxima de 10 metros en su parte más alta y la carga permanente para entrepisos y techos no debe exceder los 95 kg/m<sup>2</sup> (p.10/12).

## 1.3 Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI)

De acuerdo con el AISI,

la especificación S100-16 (AISI, 2016b), establece los parámetros que se deben seguir para diseñar elementos estructurales conformados en frío a partir de láminas, tiras, placas o barras de acero al carbono o de baja aleación, con un espesor no superior 1 pulgada (25,4 mm) y utilizados para soportar cargas en edificios y otras estructuras diferentes a los edificios, siempre y cuando se tomen en cuenta los efectos dinámicos (p.1).

La especificación ofrece dos métodos para obtener soluciones analíticas en el diseño de elementos estructurales. Estos métodos son el Método de Ancho Efectivo y el Método de Resistencia Directa, los cuales están permitidos para el diseño básico de elementos en los capítulos que van desde la E hasta la H en la especificación.

La S100-16 aclara que no existe preferencia entre los dos métodos, ya que ambos brindan niveles consistentes de confiabilidad, aunque es posible que algunos casos las respuestas numéricas resultantes no sean idénticas. Es relevante destacar que tanto el Método de Ancho Efectivo como el Método de Resistencia Directa son igualmente válidos y aceptables. Asimismo, es importante subrayar que los diseños empleados con ambos métodos deben considerar el factor de resistencia,  $\phi$ , de acuerdo con el diseño por LRFD y además deben cumplir con las limitaciones dimensionales establecidas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Límites de aplicabilidad para el diseño de elementos de los capítulos E al H mediante el método del ancho efectivo y el método de resistencia directa.

Criterios	Variables limitantes <sup>a</sup>	Método de Ancho Efectivo	Método de Resistencia Directa
Elemento rigidizado en compresión	$w/t^b$	$\leq 500$	$\leq 500$
Elemento con borde rigidizado en compresión	$b/t$	$\leq 90$ para $I_s \geq I_a$ $\leq 60$ para $I_s < I_a$	$\leq 160$
Elemento no rigidizado en compresión	$d/t^b$	$\leq 60$	$\leq 60$
Elemento rígido en flexión (e.j. un alma)	$h/t$	$\leq 200$ para almas no rigidizadas $\leq 260$ para refuerzo de apoyos $\leq 300$ para refuerzo de apoyo intermedios	$\leq 300$
Radio de curvatura interior	$R/t$	$\leq 10^d$	$\leq 20$
Relación longitud/anchura del refuerzo de borde simple	$d_o/b_o$	$\leq 0.7$	$\leq 0.7$
Tipo de refuerzo de borde		Simple	Simple y complejo
Número máximo de rigidizadores intermedios en w	$n_f$	4	4
Número máximo de rigidizadores intermedios en b	$n_{fe}$	2	2
Número de refuerzos intermedios en h	$n_w$	0	4
Esfuerzo de fluencia nominal	$F_y$	$< 80$ ksi (552 MPa) <sup>e</sup>	$< 95$ ksi (655 MPa) <sup>e</sup>

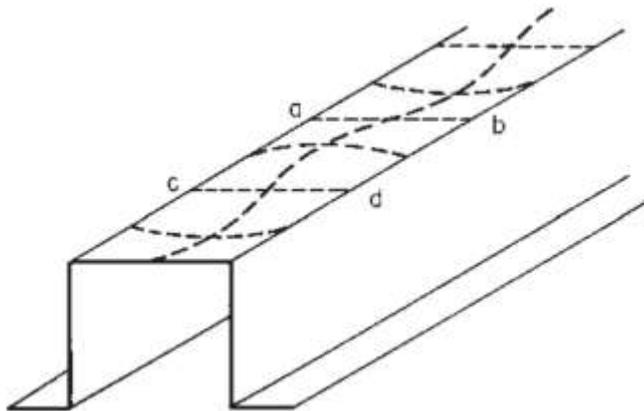
Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016a.

# 1.4 Pandeo en elementos laminados en frío.

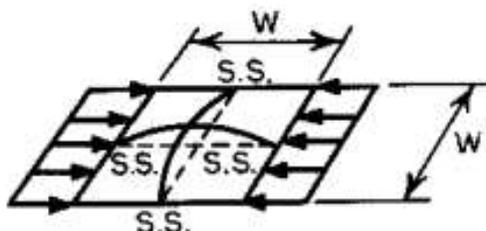
De acuerdo con el American Iron and Steel Institute (2016a) las principales formas de pandeo que pueden ocurrir en un componente de acero conformado en frío abarcan el pandeo local, el pandeo distorsional y el pandeo global dentro del cual se encuentra el pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por flexión-torsión para elementos en compresión y pandeo por torsión lateral para miembros en flexión. A continuación, se describen algunos de estos.

## 1.4.1 Pandeo local

Wei-Wen Yu (2019) determinó que: la resistencia de un elemento rigidizado bajo compresión uniforme puede ser gobernado por pandeo local, como se muestra en la figura 1. Esto resulta en un esfuerzo menor que el límite elástico, especialmente si la relación  $w/t$  (ancho/espesor) es relativamente grande. Si se considera una placa cuadrada simplemente apoya (S.S) y sometida a esfuerzos de compresión en una dirección, ésta experimentará un pandeo en forma de curvatura simple en dos direcciones, como se muestra en la figura 2. Sin embargo, Wei-Wen Yu, también señala que: en una sección individual, la longitud del elemento suele ser mayor que su ancho. Por lo tanto, el comportamiento puede describirse como se presenta en la figura 3, lo cual ilustra un ejemplo similar al que se observa en la figura 1.



**Figura 1.** Pandeo local del ala rigidizada en compresión de una viga en forma de sombrero.  
Fuente: Wei-Wen Yu, 2019.



**Figura 2.** Placa cuadrada sometida a esfuerzos de compresión.  
Fuente: Wei-Wen Yu, 2019.

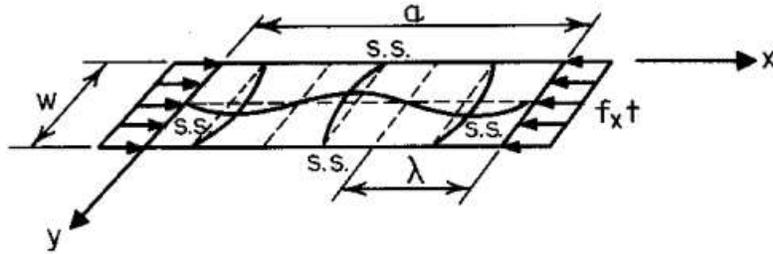


Figura 3. Placa rectangular sometida a esfuerzos de compresión.  
Fuente: Wei-Wen Yu, 2019.

Según Caamaño Palau (2009), “este modo de pandeo implica exclusivamente deformaciones en la placa, sin que se produzcan desplazamientos en las interacciones de las líneas de dos elementos de placa adyacentes, como se puede observar en la figura 4”. Además, Caamaño Palau destaca que: “una característica del pandeo local es que su longitud de pandeo es la más corta entre los modos, y por lo general, es menor que la anchura de cualquiera de las placas que componen la sección del perfil”.

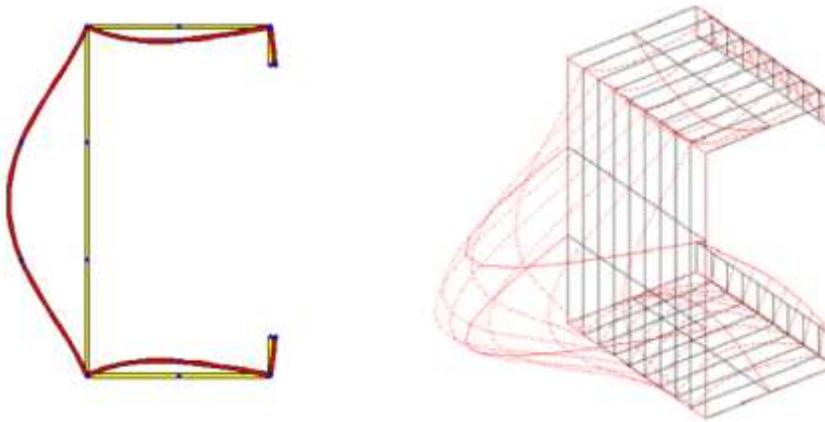


Figura 4. Pandeo local de una sección C.  
Fuente: Caamaño Palau, 2009.

Es relevante destacar que: para realizar cálculos relacionados con el pandeo local, la especificación S100-16 del Instituto Americano de Hierro y Acero requiere de un coeficiente de pandeo de la placa ( $k$ ). Este coeficiente puede ser determinado mediante la figura 5, en la cual, a partir de las condiciones de apoyo y los esfuerzos a los que están sometidas las placas, es posible determinar este coeficiente. Por ejemplo, para elementos rígidos a compresión soportados por un alma en cada borde longitudinal, el valor del coeficiente de pandeo de la placa corresponde a 4.

### Values of Plate Buckling Coefficients

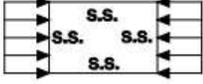
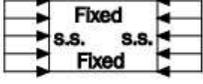
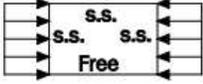
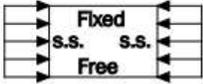
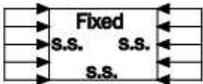
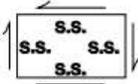
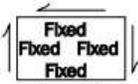
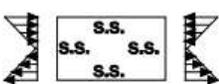
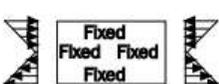
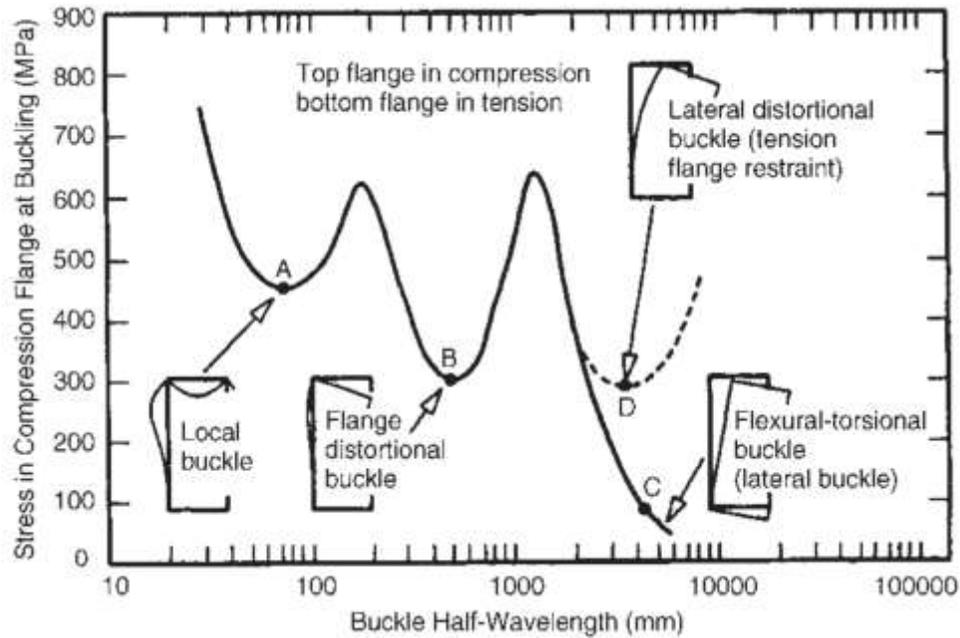
Case	Boundary Condition	Type of Stress	Value of k for Long Plate
(a)		Compression	4.0
(b)		Compression	6.97
(c)		Compression	0.425
(d)		Compression	1.277
(e)		Compression	5.42
(f)		Shear	5.34
(g)		Shear	8.98
(h)		Bending	23.9
(i)		Bending	41.8

Figura 5. Coeficiente de pandeo de la placa ( $k$ ).  
Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016a.

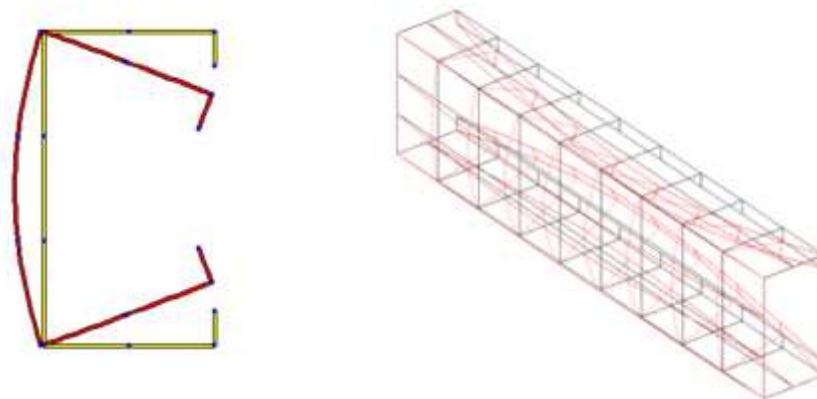
## 1.4.2 Pandeo por distorsión

De acuerdo con Wei-Wen Yu (2019), en elementos con alas de borde rigidizado, la resistencia a la flexión puede verse limitada por el pandeo por distorsión, como se muestra en la figura 6. El modo de pandeo local de una sección C en flexión en su eje principal implica el pandeo de la porción comprimida del alma, el ala en compresión y el rigidizador de borde, sin que se produzca movimiento en la unión de la línea entre el alma y el rigidizador de borde. Para el modo de pandeo por distorsión del ala, el ala y el refuerzo de borde giran alrededor de la unión ala-alma, con cierta resistencia rotacional proporcionada por el alma. Es importante destacar que este modo de falla ocurre en longitudes de onda considerablemente más larga que el pandeo local, pero generalmente de longitud de onda más corta que el pandeo lateral-torsional (p.234).



**Figura 6.** Esfuerzo de pandeo de una sección C versus longitud media de onda para flexión en el eje principal.  
**Fuente:** Wei-Wen Yu, 2019.

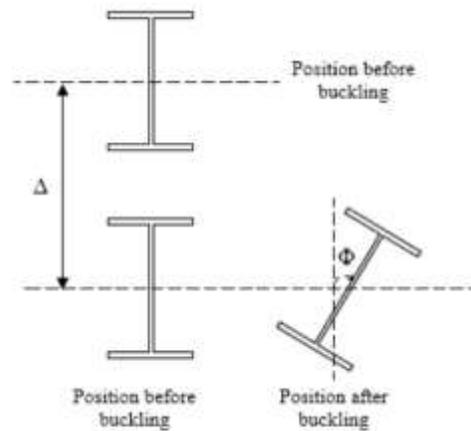
Caamaño Palau (2009), argumenta que el pandeo distorsional puede describirse como un modo que implica la distorsión de la sección del perfil y que involucra la traslación de alguna de las líneas de intersección entre dos elementos de placa adyacentes, además de deformaciones en la placa, como se puede observar en la figura 7.



**Figura 6.** Pandeo distorsional (simétrico) de un perfil de sección tipo C.  
**Fuente:** Caamaño Palau, 2009.

### 1.4.3 Pandeo lateral torsional

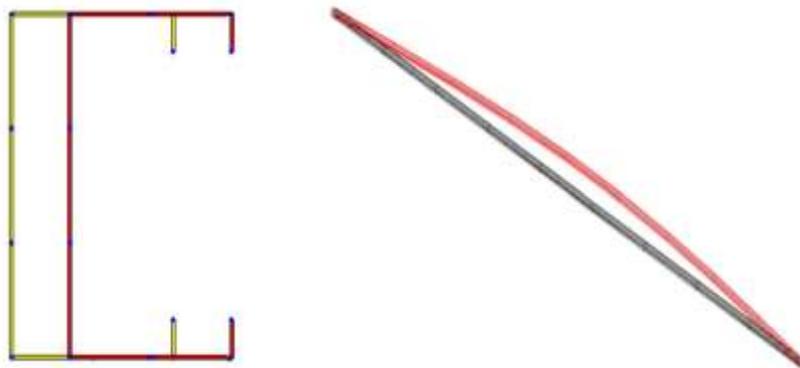
Según Kabir & Bhowmick (2016), el pandeo lateral torsional es un estado en el cual el elemento presenta tanto deflexión como torsión (figura 7), generalmente miembros a flexión como vigas y columnas, muestran una resistencia considerablemente mayor alrededor de su eje principal en comparación con su eje secundario o menor, es por esta razón que las vigas y las columnas sin soporte lateral pueden experimentar una falla por pandeo lateral antes de alcanzar su capacidad máxima en el plano. Por lo tanto, el pandeo lateral torsional se puede considerar como una condición crítica en el diseño estructural en la que la deformación cambia de una flexión predominante en el plano a una deflexión lateral-torsional.



**Figura 7.** Pandeo lateral torsional  
**Fuente:** Kabir & Bhowmick, 2016.

### 1.4.4 Pandeo global

De acuerdo con Caamaño Palau (2009), el pandeo global es un tipo de pandeo en el cual el perfil experimenta deformaciones sin que su forma se vea alterada. En consecuencia, las deformaciones se caracterizan por el desplazamiento de la directriz del perfil, ya sea con o sin torsión. Según las deformaciones observadas, este tipo de pandeo puede dividirse en pandeo global flexión alrededor de un eje y pandeo global de flexión con torsión. En la figura 8 se muestra la deformación por pandeo global de flexión de un perfil tipo C.



**Figura 8.** Pandeo global de flexión de un perfil tipo C.  
**Fuente:** Caamaño Palau, 2009.

# 1.5 Propiedades geométricas

Con la finalidad de que el sistema no dependa de una base de datos o de fichas técnicas exclusivas de algunas empresas, se sugiere que el usuario ingrese los datos que se presentan en las figuras 9, 11 y 13. Y a partir de estos se podrá calcular las propiedades necesarias para emplear métodos que permitan obtener soluciones analíticas.

## 1.5.1 Elementos tipo C

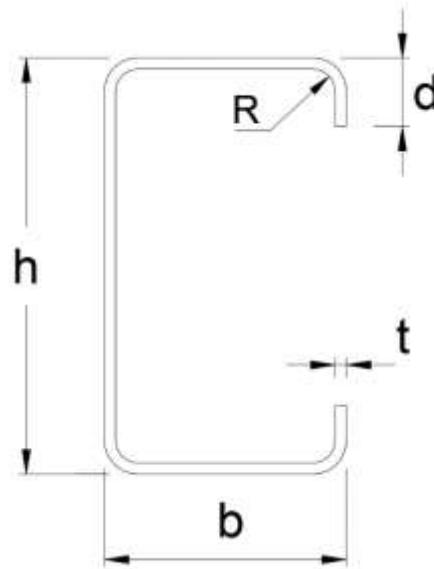
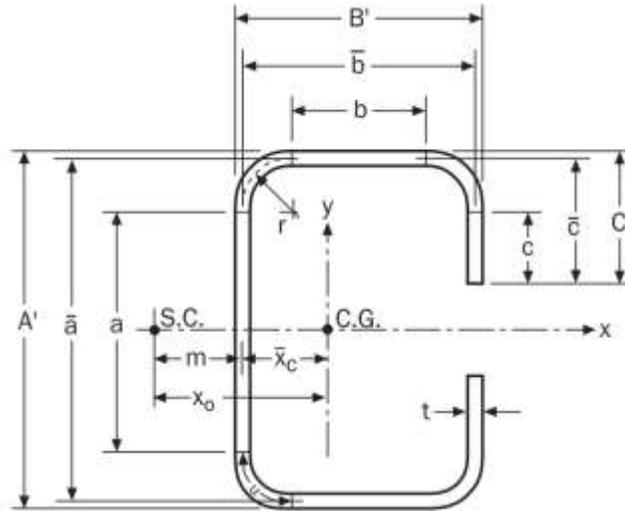


Figura 9. Datos de una sección tipo C.

Las siguientes propiedades son tomadas del Manual de Diseño de Acero Conformado en Frío del Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI, 2013).



**Figura 10.** Datos definidos por el AISI para una sección tipo C.  
Fuente: AISI, 2013.

Al comparar la figura 9 con la 10 se tienen las siguientes equivalencias, respectivamente:

$$h = A' \quad \text{Ecuación 1}$$

$$b = B' \quad \text{Ecuación 2}$$

$$d = C' \quad \text{Ecuación 3}$$

Para la obtención de las propiedades del elemento tipo C, el AISI Manual se proponen las siguientes ecuaciones:

✓ Parámetros básicos

$$r = R + \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$a = A' - (2r + t) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\bar{a} = A' - t \quad \text{(Ec. 6) Ecuación 6}$$

$$b = B' \left[ r + \frac{t}{2} + \alpha \left( r + \frac{t}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\bar{b} = B' - \left( \frac{t}{2} + \alpha \cdot \frac{t}{2} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$c = \alpha \left[ C' - \left( r + \frac{t}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\bar{c} = \alpha \left( C' - \frac{t}{2} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$u = \frac{\pi r}{2} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\alpha = 1, \text{ para perfiles con atiesadores} \quad \text{Ecuación 12}$$

✓ Área transversal de la sección

$$A_g = t[a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u)] \quad \text{Ecuación 13}$$

- ✓ Momento de inercia sobre el eje x

$$I_x = 2t \left\{ \begin{array}{l} 0.0417a^3 + b \left( \frac{a}{2} + r \right)^2 + u \left( \frac{a}{2} + 0.637r \right)^2 + 0.149r^3 \\ + \alpha \left[ 0.0833c^3 + \frac{c}{4}(a-c)^2 + u \left( \frac{a}{2} + 0.637r \right)^2 + 0.149r^3 \right] \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 14}$$

- ✓ Distancia entre el centroide y la línea central del alma

$$\bar{x}_c = \frac{2t}{A} \left\{ b \left( \frac{b}{2} + r \right) + u(0.363r) + \alpha [u(b + 1.637r) + c(b + 2r)] \right\} \quad \text{Ecuación 15}$$

- ✓ Distancia entre el centroide y el exterior del alma

$$\bar{x} = \bar{x}_c + \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 16}$$

- ✓ Momento de inercia sobre el eje y

$$I_y = 2t \left\{ \begin{array}{l} b \left( \frac{b}{2} + r \right)^2 + \frac{b^3}{12} + 0.356r^3 \\ + \alpha [c(b - 2r)^2 + u(b + 1.637r)^2 + 0.149r^3] \end{array} \right\} - A \bar{x}_c^2 \quad \text{Ecuación 17}$$

- ✓ Distancia entre el centro de corte (S.C) y la línea central del alma

$$m = \bar{b} \left[ \frac{3\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(6\bar{a}^2 - 8\bar{c}^2)}{\bar{a}^3 + 6\bar{a}^2\bar{b} + \alpha\bar{c}(8\bar{c}^2 - 12\bar{a}\bar{c} + 6\bar{a}^2)} \right] \quad \text{Ecuación 18}$$

- ✓ Distancia entre el centroide (C.G) y el centro de corte (S.C)

$$x_0 = -(\bar{x}_c + m), \text{ medido en direccion negativa} \quad \text{Ecuación 19}$$

- ✓ Constante de torsión de St. Venant

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u + \alpha(2c + 2u)] \quad \text{Ecuación 20}$$

- ✓ Constante de alabeo torsional

$$C_w = \frac{\bar{a}^2\bar{b}^2t}{12} \left\{ \frac{2\bar{a}^3\bar{b} + 3\bar{a}^2\bar{b}^2 + \alpha \left[ \begin{array}{l} 48\bar{c}^4 + 112\bar{b}\bar{c}^3 + 8\bar{a}\bar{c}^3 + 48\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 \\ + 12\bar{a}^2\bar{c}^2 + 12\bar{a}^2\bar{b}\bar{c} + 6\bar{a}^3\bar{c} \end{array} \right]}{6\bar{a}^2\bar{b} + (\bar{a} + \alpha 2\bar{a})^3 - \alpha 24\bar{a}\bar{c}^2} \right\} \quad \text{Ecuación 21}$$

- ✓ Parámetro  $\beta_w$

$$\beta_w = - \left[ \frac{t\bar{x}_c\bar{a}^3}{12} + t\bar{x}_c^3\bar{a} \right] \quad \text{Ecuación 22}$$

- ✓ Parámetro  $\beta_f$

$$\beta_f = \frac{t}{2} [(\bar{b} - \bar{x}_c)^4 - \bar{x}_c^4] + \frac{t\bar{a}^2}{4} [(\bar{b} - \bar{x}_c)^4 - \bar{x}_c^4] \quad \text{Ecuación 23}$$

- ✓ Parámetro  $\beta_l$

$$\beta_l = \alpha \left\{ 2\bar{c}t(\bar{b} - \bar{x}_c)^3 + \frac{2}{3}t(\bar{b} - \bar{x}_c) \left[ \left(\frac{\bar{a}}{2}\right)^3 - \left(\frac{\bar{a}}{2} - \bar{c}\right)^3 \right] \right\} \quad \text{Ecuación 24}$$

- ✓ Parámetro utilizado en la determinación del momento crítico elástico:

$$j = \frac{1}{2I_y} (\beta_w + \beta_f + \beta_l) - x_0 \quad \text{Ecuación 25}$$

## 1.5.2 Elementos tipo Z

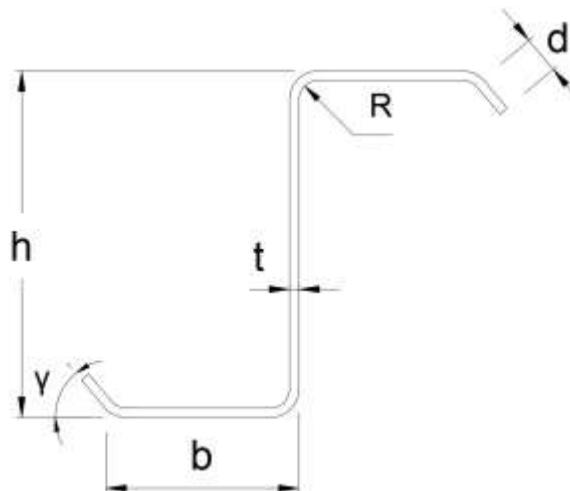
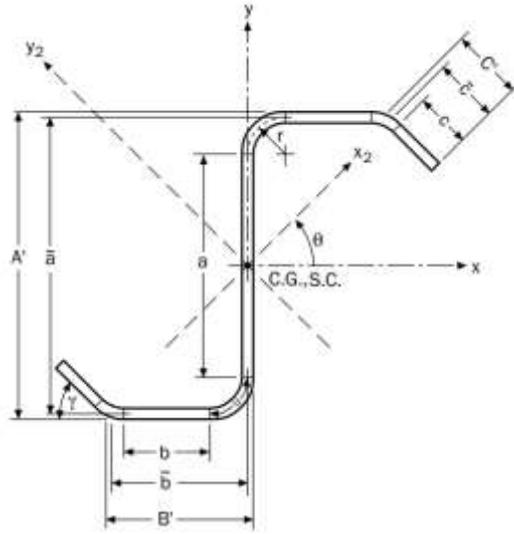


Figura 11. Datos de una sección tipo Z.

Las siguientes propiedades son tomadas del Manual de Diseño de Acero Conformado en Frío del Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI, 2013).



**Figura 12.** Datos definidos por el AISI para una sección tipo z.  
Fuente: AISI, 2013.

Al comparar la figura 11 con la 12 se tienen las siguientes equivalencias, respectivamente:

$$h = A' \quad \text{Ecuación 26}$$

$$b = B' \quad \text{Ecuación 27}$$

$$d = C' \quad \text{Ecuación 28}$$

Para la obtención de las propiedades del elemento tipo Z, el AISI Manual se proponen las siguientes ecuaciones:

✓ Parámetros básicos

$$r = R + \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$a = A' - (2r + t) \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\bar{a} = A' - t \quad \text{Ecuación 31}$$

$$b = B' \left[ r + \frac{t}{2} + \alpha \left( r + \frac{t}{2} \right) \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\bar{b} = B' - \left[ \frac{t}{2} + \left( \frac{\alpha t}{2} \right) \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 33}$$

$$c = \alpha \left[ C' - \left( r + \frac{t}{2} \right) \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\bar{c} = \alpha \left[ C' - \left( \frac{t}{2} \right) \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 35}$$

$$u_1 = \frac{\pi r}{2} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$u_2 = \gamma r \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\alpha = 1, \text{ para perfiles con atiesadores} \quad \text{Ecuación 38}$$

✓ Área transversal de la sección

$$A_g = t[a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)] \quad \text{Ecuación 39}$$

- ✓ Momento de inercia sobre el eje x

$$I_x = 2t \left\{ \begin{array}{l} 0.0417a^3 + b \left( \frac{a}{2} + r \right)^2 + u_1 \left( \frac{a}{2} + 0.637r \right)^2 + 0.149r^3 \\ + \alpha \left[ \left( \frac{Y + \sin(Y) \cos(Y)}{2} - \frac{\sin(Y)^2}{Y} \right) r^3 + u_2 \left( \frac{a}{2} + \frac{r \sin(Y)}{Y} \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{c^3 \sin(Y)^2}{12} + c \left( \frac{a}{2} + r \cos(Y) - \frac{c}{2} \sin(Y) \right)^2 \right] \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 40}$$

- ✓ Momento de inercia sobre el eje y,

$$I_y = 2t \left\{ \begin{array}{l} b \left( \frac{b}{2} + r \right)^2 + \frac{b^3}{12} + 0.356r^3 + \alpha \left[ c \left( b - r(1 + \sin(Y)) + \frac{c}{2} \cos(Y) \right)^2 + \frac{c^3 \cos(Y)^2}{12} \right. \\ \left. + u_2 \left( b + r + \frac{r(1 - \cos(Y))}{Y} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{Y - \sin(Y) \cos(Y)}{2} - \frac{(1 - \cos(Y))^2}{Y} \right) r^3 \right] \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 41}$$

- ✓ Producto de inercias

$$I_{xy} = 2t \left\{ \begin{array}{l} b \left( \frac{a}{2} + r \right) \left( \frac{b}{2} + r \right) + 0.5r^3 + 0.285r^3 \\ + \alpha \left[ c \left( b + r(1 + \sin(Y)) + \frac{c}{2} \cos(Y) \right) \left( \frac{a}{2} + r \cos(Y) - \frac{c}{2} \sin(Y) \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{\sin(Y)^2}{2} + \frac{\sin(Y) \cos(Y - 1)}{Y} \right) r^3 - \frac{c^3 \sin(Y) \cos(Y)}{12} \right. \\ \left. + u_2 \left( b + r + \frac{r(1 - \cos(Y))}{Y} \right) \left( \frac{a}{2} + \frac{r \sin(Y)}{Y} \right) \right] \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 42}$$

- ✓ Ángulo entre el eje x y el eje principal menor, **en radianes**.

$$\theta = \frac{\pi}{2} + 0.5 \arctan \left( \frac{2I_{xy}}{I_y - I_x} \right) \quad \text{Ecuación 43}$$

- ✓ Inercia del elemento sobre el eje x<sub>2</sub>

$$I_{x_2} = I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta - 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad \text{Ecuación 44}$$

- ✓ Inercia del elemento sobre el eje y<sub>2</sub>

$$I_{y_2} = I_x \sin^2 \theta + I_y \cos^2 \theta + 2I_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad \text{Ecuación 45}$$

- ✓ Radio de giro sobre cualquier eje

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

*Ecuación 46*

- ✓ Radio mínimo de giro, sobre el eje  $x_2$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I_{x2}}{A}}$$

*Ecuación 47*

- ✓ Constante de torsión de St. Venant

$$J = \frac{t^3}{3} [a + 2b + 2u_1 + \alpha(2c + 2u_2)]$$

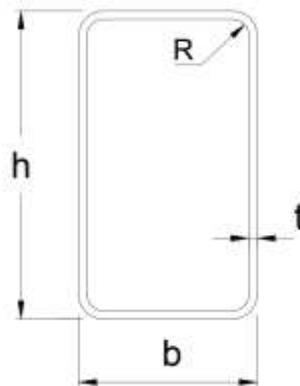
*Ecuación 48*

- ✓ Constante de alabeo torsional

$$C_w = \frac{t}{12} \left\{ \frac{\alpha^2 \bar{b}^3 (2\bar{a} + \bar{b}) + \alpha \left[ \begin{array}{l} \bar{b}^2 (4\bar{c}^4 + 16\bar{b}\bar{c}^3 + 6\bar{a}^3\bar{c} + 4\bar{a}^2\bar{b}\bar{c} + 8\bar{a}\bar{c}^3) \\ + 6\bar{a}\bar{b}\bar{c}^2 (\bar{a} + \bar{b}) (2\bar{b} \sin(\gamma) + \bar{a} \cos(\gamma)) \\ + 4\bar{a}\bar{b}\bar{c}^3 (2\bar{a} + 4\bar{b} + \bar{c}) \sin(\gamma) \cos(\gamma) \\ + \bar{c}^3 (2\bar{a}^3 + 4\bar{a}^2\bar{b} - 8\bar{a}\bar{b}^2 + \bar{a}^2\bar{c} - 16\bar{b}^3 - 4\bar{b}^2\bar{c}) \cos^2 \gamma \end{array} \right]}{\bar{a} + 2(\bar{b} + \alpha\bar{c})} \right\}$$

*Ecuación 49*

### 1.5.3 Elementos rectangulares



**Figura 13.** Datos de una sección rectangular.

Las siguientes propiedades son propuestas tomando como referencia las ecuaciones establecidas en el Manual de Diseño de Acero Conformado en Frío del Instituto Americano de Hierro y Acero para elementos de tipo C y Z, y se adaptan para así determinar las propiedades de los elementos rectangulares.

✓ Parámetros básicos

$$r = R + \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 50}$$

$$h_{efectiva} = h - 2(R + t) \quad \text{Ecuación 51}$$

$$b_{efectiva} = b - 2(R + t) \quad \text{Ecuación 52}$$

$$u = \frac{\pi r}{2} \quad \text{Ecuación 53}$$

✓ Área transversal de la sección

$$A = t[2h_{efectiva} + 2b_{efectiva} + 4u] \quad \text{Ecuación 54}$$

Los momentos de inercia del elemento se obtienen, mediante el teorema de ejes paralelos, cuya ecuación, de acuerdo con Hibbeler (2017), se describe de la siguiente manera:

$$I = \bar{I} + A \cdot d^2 \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde:

$\bar{I}$  = Momento de inercia un área

$A$  = Área de la figura

$d$  = distancia entre el centriode de la figura y el eje correspondiente

Además del teorema de ejes paralelos, también se hace uso de las ecuaciones de momentos de inercia para elementos lineales circulares con un ángulo entre los 0 a 90 grados. Estas ecuaciones son proporcionadas en el Manual AISI (2013) y se presentan a continuación:

$$l = \frac{\pi r}{2} \quad \text{Ecuación 56}$$

$$c = 0.637 r \quad \text{Ecuación 57}$$

$$I_1 = I_2 = 0.149 r^3 \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde: los parámetros anteriores se describen en la figura 10.

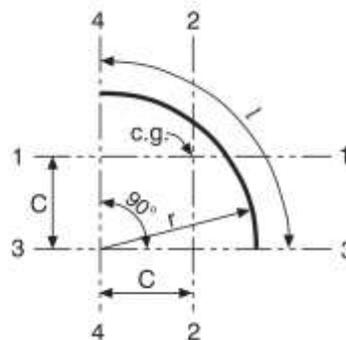


Figura 14. Elemento lineal circular con un ángulo entre los 0 a 90 grados.

Fuente: AISI, 2013.

A partir de los datos anteriores se proponen las siguientes ecuaciones para determinar el momento de inercia de elementos rectangulares.

- ✓ Momento de inercia sobre el eje x

$$I_x = t \left\{ \begin{array}{l} 2 \left( \frac{h_{efectiva}^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{b_{efectiva}}{12} t^2 + b_{efectiva} \left( \frac{h-t}{2} \right)^2 \right) \\ + 4 I_1 + 4 l \left( \frac{h_{efectiva}}{2} + c \right)^2 \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 59}$$

- ✓ Momento de inercia sobre el eje y

$$I_y = t \left\{ \begin{array}{l} 2 \left( \frac{b_{efectiva}^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{h_{efectiva}}{12} t^2 + h_{efectiva} \left( \frac{b-t}{2} \right)^2 \right) \\ + 4 I_2 + 4 l \left( \frac{b_{efectiva}}{2} + c \right)^2 \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 60}$$

- ✓ Radio de giro sobre cualquier eje x

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad \text{Ecuación 61}$$

- ✓ Radio mínimo de giro, sobre el eje y

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad \text{Ecuación 62}$$

- ✓ Constante de torsión de St. Venant

Según el Instituto Canadiense de Construcción en Acero (2002), la constante torsional de St. Venant se puede estimar de forma conservadora, a partir de la siguiente ecuación:

$$J = \frac{4((h-t) \cdot (b-t) - r^2 \cdot (4-\pi))^2 t}{2((h-t) + (b-t)) - 2r^2 \cdot (4-\pi)} \quad \text{Ecuación 63}$$

- ✓ Constante de alabeo torsional

En cuanto, a la constante de alabeo torsional, el Instituto Canadiense de Construcción en Acero (2002), establece que la constante suele considerarse como cero.

$$C_w = 0 \quad \text{Ecuación 64}$$

# 1.6 Diseño de elementos

Los siguientes procedimientos son tomados de la especificación S100-2016 (AISI, 2016b) y siguen los métodos de Resistencia Directa y LRFD. Es importante destacar que en este apartado se utilizan símbolos o variables cuyas definiciones varían según la sección en particular. Por lo tanto, para determinar las definiciones precisas de las diferentes variables, es necesario consultar la sección de símbolos de la especificación y tener claro a qué sección pertenece la variable en cuestión.

## 1.6.1 Capacidad a tensión

Para calcular la capacidad a la tensión se utiliza la sección D del AISI, en la cual la resistencia a la tracción del elemento propuesto se determina, mediante la sección D2 para calcular la capacidad del elemento en términos de fluencia y la sección D3 para determinar la resistencia por ruptura, como se muestra continuación:

- ✓ Resistencia por fluencia

$$\begin{aligned}\phi_t &= 0.90 \\ T_n &= A_g \cdot F_y\end{aligned}$$

*Ecuación 65*

*Ecuación 66*

- ✓ Resistencia por ruptura

$$\begin{aligned}\phi_t &= 0.75 \\ T_n &= A_g \cdot F_u\end{aligned}$$

*Ecuación 67*

*Ecuación 68*

## 1.6.2 Capacidad a compresión

Para determinar la resistencia a la compresión se utiliza un factor de seguridad,  $\phi_c$ , correspondiente a 0.85 de acuerdo con la metodología de diseño LRFD, tal y como se establece en el capítulo E de la especificación S100-2016 (AISI, 2016b).

Mediante la sección E2.1, es posible determinar la resistencia de diseño por fluencia y pandeo global para miembros tipo C y Z en compresión, no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional, a través de los siguientes cálculos:

$$F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \text{Ecuación 69}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad \text{Ecuación 70}$$

$$\text{Si } \lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad \text{Ecuación 71}$$

$$\text{Si } \lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad \text{Ecuación 72}$$

$$P_{ne} = A_g \cdot F_n \quad \text{Ecuación 73}$$

Para elementos rectangulares, la especificación S100-16 (AISI, 2016b) establece la sección E2.1 y la sección E2.1.1, con las cuales es posible determinar la resistencia de diseño por fluencia y pandeo global para este tipo de elementos cuando se encuentran en compresión y no están sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional. Los cálculos pertinentes se retallan a continuación:

$$k_c = \text{Coeficiente de pandeo de la placa, según figura 5.} \quad \text{Ecuación 74}$$

$$F_{cre\ell} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Ecuación 75}$$

$$L_o = \pi r \sqrt{\frac{E}{F_{cre\ell}}} \quad \text{Ecuación 76}$$

$$R_r = 0.65 + \frac{0.35 (KL)}{1.1 L_o} \quad \text{Ecuación 77}$$

$$\text{Si } KL < 1.1 L_o \rightarrow F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{R_r r}\right)^2} \quad \text{Ecuación 78}$$

$$\text{Si } KL \geq 1.1 L_o \rightarrow F_{cre} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \text{Ecuación 79}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad \text{Ecuación 80}$$

$$\text{Si } \lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658\lambda_c^2) F_y \quad \text{Ecuación 81}$$

$$\text{Si } \lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad \text{Ecuación 82}$$

$$P_{ne} = A_g \cdot F_n \quad \text{Ecuación 83}$$

La resistencia de diseño a la fluencia y pandeo global para miembros tubulares y tipo C en compresión, cuando están sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión, se puede determinar, de acuerdo con la sección E2.2 del AISI, de la siguiente manera:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Ecuación 84}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Ecuación 85}$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L_x}{r_x}\right)^2} \quad \text{Ecuación 86}$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{x_o}{r_o}\right)^2 \quad \text{Ecuación 87}$$

$$F_{cre} = \frac{1}{2\beta} \left[ (\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad \text{Ecuación 88}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad \text{Ecuación 89}$$

$$\text{Si } \lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658\lambda_c^2) F_y \quad \text{Ecuación 90}$$

$$\text{Si } \lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad \text{Ecuación 91}$$

$$P_{ne} = A_g \cdot F_n \quad \text{Ecuación 92}$$

En el caso de los elementos tipo Z, la resistencia diseño por fluencia y pandeo global para un elemento en compresión, cuando está sujeto a pandeo por torsión o por flexión-torsión, se puede determinar, de acuerdo con la sección E2.3 del AISI, de la siguiente forma:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Ecuación 93}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Ecuación 94}$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{x_o}{r_o}\right)^2 \quad \text{Ecuación 95}$$

$$F_{cre} = \min \left\{ \sigma_t, \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \right\} \quad \text{Ecuación 96}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad \text{Ecuación 97}$$

$$\text{Si } \lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad \text{Ecuación 98}$$

$$\text{Si } \lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \quad \text{Ecuación 99}$$

$$P_{ne} = A_g \cdot F_n \quad \text{Ecuación 100}$$

La resistencia a la compresión en elementos rectangulares, de tipo C y Z, cuando se trata del pandeo local que interactúa con la fluencia y el pandeo global, se especifica en la sección E3.2.1 del AISI y se calcula de la siguiente manera:

$$F_{cr\ell} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w}\right)^2 \quad \text{Ecuación 101}$$

$$P_{cr\ell} = A_g \cdot F_{cr\ell} \quad \text{Ecuación 102}$$

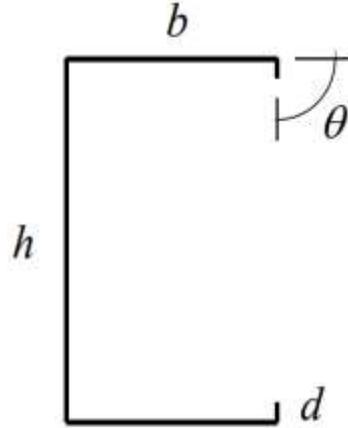
$$\lambda_\ell = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{cr\ell}}} \quad \text{Ecuación 103}$$

$$\text{Si } \lambda_\ell \leq 0.776 \rightarrow P_{n\ell} = P_{ne} \quad \text{Ecuación 104}$$

$$\text{Si } \lambda_\ell > 0.776 \rightarrow P_{n\ell} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}}\right)^{0.4}\right] \left(\frac{P_{cr\ell}}{P_{ne}}\right)^{0.4} P_{ne} \quad \text{Ecuación 105}$$

Nota:  $P_{ne}$  se define en la sección E2 y varía según si la sección está sujeta a torsión o no.

Según la especificación S100-16 (AISI, 2016b), se debe evaluar la resistencia axial nominal para el pandeo por distorsión en elementos de tipo C y Z. En el caso de los elementos de tipo C, esta resistencia se puede determinar siguiendo la Sección E4.1 del AISI, mediante las propiedades geométricas presentadas en la figura 15 y las ecuaciones siguientes:



**Figura 15.** Propiedades geométricas de una sección C.  
Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016b.

$$A_f = (b + d) t \quad \text{Ecuación 106}$$

$$J_f = \frac{1}{3} b \cdot t^3 + \frac{1}{3} d \cdot t^3 \quad \text{Ecuación 107}$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2 b^2 + b d^3 + t^2 b d + d^4)}{12(b+d)} \quad \text{Ecuación 108}$$

$$I_{yf} = \frac{t b^2 d^2}{4(b+d)} \quad \text{Ecuación 102}$$

$$C_{wf} = 0 \quad \text{Ecuación 109}$$

$$x_{of} = \frac{b^2}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 110}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db)}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 112}$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 113}$$

$$L_{crd} = \left\{ \frac{6\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left[ I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] \right\}^{1/4} \quad \text{Ecuación 114}$$

$$k_{\phi fe} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \left[ E \cdot I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + E \cdot C_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 G \cdot J_f \quad \text{Ecuación 115}$$

$$k_{\phi we} = \frac{E t^3}{6 h_o (1-\mu^2)} \quad \text{Ecuación 116}$$

$k_\phi$  = Rigidez rotacional provista por un elemento de restricción (riestra, panel, tablero de cerramiento) a la unión aleta-alma de un miembro (cero si la aleta en compresión no está restringida). Si la rigidez rotacional proporcionada a las dos bridas es desigual, se utiliza la menor rigidez rotacional. *Ecuación 117*

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left\{ A_f \left[ (x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 - 2y_{of}(x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad \text{Ecuación 118}$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \frac{th_0^3}{60} \quad \text{Ecuación 119}$$

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad \text{Ecuación 120}$$

$$P_{crd} = A_g F_{crd} \quad \text{Ecuación 121}$$

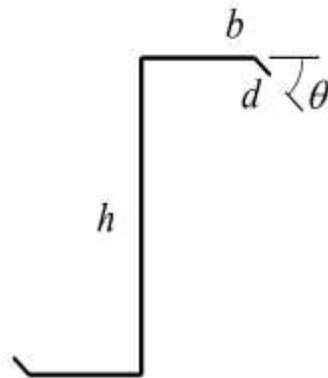
$$P_y = A_g F_y \quad \text{Ecuación 122}$$

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad \text{Ecuación 123}$$

$$\text{Si } \lambda_d \leq 0.561 \rightarrow P_{nd} = P_y \quad \text{Ecuación 124}$$

$$\text{Si } \lambda_d > 0.561 \rightarrow P_{nd} = \left[ 1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y}\right)^{0.6} P_y \quad \text{Ecuación 125}$$

La resistencia axial nomina para el pandeo por distorsión de una sección tipo Z se puede determinar siguiendo las directrices de la sección E4.1 de la especificación S100-16 (AISI, 2016b). Esto se realiza, a partir de las propiedades geométricas de la figura 16.



**Figura 16.** Propiedades geométricas de una sección Z.  
Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016.

$$A_f = (b + d) t \quad \text{Ecuación 126}$$

$$J_f = \frac{1}{3} b \cdot t^3 + \frac{1}{3} d \cdot t^3 \quad \text{Ecuación 127}$$

$$I_{xf} = \frac{t(t^2 b^2 + 4bd^3 - 4bd^3 \cos^2(\theta) + t^2 bd + d^4 - d^4 \cos^2(\theta))}{12(b+d)} \quad \text{Ecuación 128}$$

$$I_{yf} = \frac{t(b^4 + 4db^3 + 6d^2b^2 \cos(\theta) + 4d^3b \cos^2(\theta) + d^4 \cos^3(\theta))}{12(b+d)} \quad \text{Ecuación 129}$$

$$C_{wf} = 0 \quad \text{Ecuación 130}$$

$$x_{of} = \frac{b^2 - d^2 \cos(\theta)}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 131}$$

$$h_{xf} = \frac{-(b^2 + 2db + d^2 \cos(\theta))}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 132}$$

$$h_{yf} = y_{of} = \frac{-d^2 \sin(\theta)}{2(b+d)} \quad \text{Ecuación 133}$$

$$L_{crd} = \left\{ \frac{6\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left[ I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] \right\}^{1/4} \quad \text{Ecuación 134}$$

$$k_{\phi fe} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \left[ E \cdot I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + E \cdot C_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 G \cdot J_f \quad \text{Ecuación 135}$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_o(1-\mu^2)} \quad \text{Ecuación 136}$$

$k_{\phi}$  = Rigidez rotacional provista por un elemento de restricción (riostra, panel, tablero de cerramiento) a la unión aleta-alma de un miembro (cero si la aleta en compresión no está restringida). Si la rigidez rotacional proporcionada a las dos bridas es desigual, se utiliza la menor rigidez rotacional. Ecuación 137

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[ (x_{of} - h_{xf})^2 \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad \text{Ecuación 138}$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{\text{th}_0^3}{60} \quad \text{Ecuación 139}$$

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad \text{Ecuación 140}$$

$$P_{crd} = A_g F_{crd} \quad \text{Ecuación 141}$$

$$P_y = A_g F_y \quad \text{Ecuación 142}$$

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad \text{Ecuación 143}$$

$$\text{Si } \lambda_d \leq 0.561 \rightarrow P_{nd} = P_y \quad \text{Ecuación 144}$$

$$\text{Si } \lambda_d > 0.561 \rightarrow P_{nd} = \left[ 1 - 0.25 \left( \frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left( \frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y \quad \text{Ecuación 145}$$

## 1.6.3 Capacidad en flexión

La resistencia nominal a la flexión para elementos rectangulares, C y Z, es evaluada, mediante las secciones F2, F3 y, en el caso, únicamente de los elementos C y Z, la sección F4, de acuerdo con la especificación S100-16 (AISI, 2016b). En estas secciones se evalúa la resistencia para fluencia y pandeo global (lateral-torsional), la interacción de la fluencia o el pandeo global con el pandeo local, y el pandeo por distorsión, respectivamente.

Para determinar la capacidad nominal de los elementos en flexión, el AISI especifica usar un factor de seguridad,  $\phi_c$ , de 0.90 para el método LRFD.

La resistencia para fluencia y pandeo global (lateral-torsional) en secciones de caja cerrada (elementos rectangulares) es determinada por medio de las siguientes ecuaciones:

$$L_u = \frac{0.36C_b\pi}{F_y S_f} \sqrt{EGJl} \quad \text{Ecuación 146}$$

$$\text{Si } L_u \leq L \rightarrow F_{cre} = \frac{C_b\pi}{KLS_f} \sqrt{EGJl} \quad \text{Ecuación 147}$$

$$\text{Si } L_u > L \rightarrow F_n = F_y \quad \text{Ecuación 148}$$

$$\text{Si } F_{cre} \geq 2.78 F_y \rightarrow F_n = F_y \quad \text{Ecuación 149}$$

$$\text{Si } 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \rightarrow F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}}\right) \quad \text{Ecuación 150}$$

$$\text{Si } F_{cre} \leq 0.56 F_y \rightarrow F_n = F_{cre} \quad \text{Ecuación 151}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 152}$$

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad \text{Ecuación 153}$$

La determinación de la resistencia a la fluencia y pandeo global (lateral-torsional) en secciones simple o doblemente simétricas curvadas alrededor del eje simétrico se realiza, a través de las ecuaciones siguientes:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Ecuación 154}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Ecuación 155}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad \text{Ecuación 156}$$

$C_b$  = Se permite que  $C_b$  se tome de manera conservadora como unidad en todos los casos. Para voladizos o salientes donde el extremo libre no está arriostrado,  $C_b$  se tomará como unidad. *Ecuación 157*

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad \text{Ecuación 158}$$

$$\text{Si } F_{cre} \geq 2.78 F_y \rightarrow F_n = F_y \quad \text{Ecuación 159}$$

$$\text{Si } 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \rightarrow F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}}\right) \quad \text{Ecuación 160}$$

$$\text{Si } F_{cre} \leq 0.56 F_y \rightarrow F_n = F_{cre} \quad \text{Ecuación 161}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 162}$$

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad \text{Ecuación 163}$$

La resistencia para fluencia y pandeo global (lateral-torsional) en secciones simétricas simples dobladas sobre el eje centroidal perpendicular con el eje de simetría y se determinada, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Ecuación 164}$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_x L_x}{r_x}\right)^2} \quad \text{Ecuación 165}$$

$C_s = +1$ , para momento que produzca compresión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide y  $-1$ , para momento que produzca tensión en el lado del centro de corte, medido desde el centroide. Ecuación 166

$$C_{TF} = 0.6 - 0.4 \left(\frac{M_1}{M_2}\right) \quad \text{Ecuación 167}$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Ecuación 168}$$

$$F_{cre} = \frac{C_s A \sigma_{ex}}{C_{TF} S_f} \left[ j + C_s \sqrt{j^2 + r_o^2 (\sigma_t / \sigma_{ex})} \right] \quad \text{Ecuación 169}$$

$C_b =$  Se permite que  $C_b$  se tome de manera conservadora como unidad en todos los casos. Para voladizos o salientes donde el extremo libre no está arriostrado,  $C_b$  se tomará como unidad. Ecuación 170

$$\text{Si } F_{cre} \geq 2.78 F_y \rightarrow F_n = F_y \quad \text{Ecuación 171}$$

$$\text{Si } 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \rightarrow F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}}\right) \quad \text{Ecuación 172}$$

$$\text{Si } F_{cre} \leq 0.56 F_y \rightarrow F_n = F_{cre} \quad \text{Ecuación 173}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 174}$$

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad \text{Ecuación 175}$$

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad \text{Ecuación 176}$$

La determinación de la resistencia a la fluencia y pandeo global (lateral-torsional) en secciones simétricas puntuales alrededor del eje principal se realiza, a través de las ecuaciones siguientes:

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad \text{Ecuación 177}$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[ GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad \text{Ecuación 178}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{K_y L_y}{r_y} \right)^2} \quad \text{Ecuación 179}$$

$C_b$  = Se permite que  $C_b$  se tome de manera conservadora como unidad en todos los casos. Para voladizos o salientes donde el extremo libre no está arriostrado,  $C_b$  se tomará como unidad. *Ecuación 180*

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{2S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad \text{Ecuación 181}$$

$$\text{Si } F_{cre} \geq 2.78 F_y \rightarrow F_n = F_y \quad \text{Ecuación 182}$$

$$\text{Si } 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \rightarrow F_n = \frac{10}{9} F_y \left( 1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}} \right) \quad \text{Ecuación 183}$$

$$\text{Si } F_{cre} \leq 0.56 F_y \rightarrow F_n = F_{cre} \quad \text{Ecuación 184}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 185}$$

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad \text{Ecuación 186}$$

La resistencia de diseño en flexión para pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje fuerte se puede determinar siguiendo las directrices de la sección F3.2.1 del AISI, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$k_f = \text{Coeficiente de pandeo de la placa, según figura 5.} \quad \text{Ecuación 187}$$

$$F_{cr\ell} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{t}{w} \right)^2 \quad \text{Ecuación 188}$$

$$M_{cr\ell} = S_f F_{cr\ell} \quad \text{Ecuación 189}$$

$$\lambda_\ell = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{cr\ell}}} \quad \text{Ecuación 190}$$

$$\text{Si } \lambda_\ell \leq 0.776 \rightarrow M_{n\ell} = M_{ne} \quad \text{Ecuación 191}$$

$$\text{Si } \lambda_\ell > 0.776 \rightarrow M_{n\ell} = \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left( \frac{M_{cr\ell}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad \text{Ecuación 192}$$

Nota:  $M_{ne}$  se define en la sección F2 y depende de si la sección está sujeta a torsión o no.

La resistencia de diseño en flexión para pandeo por distorsión en elementos tipo C se calcula, mediante la sección F4.1 de la especificación S100-16. Esto se realiza, a partir de las siguientes ecuaciones, en las cuales se involucran parámetros que son definidos en la determinación de la resistencia axial nominal para el pandeo por distorsión.

$$L_{crd} = \left\{ \frac{4\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left[ I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \frac{\pi^4 h_o^4}{720} \right\}^{1/4} \quad \text{Ecuación 193}$$

$$k_{\phi fe} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \left[ E \cdot I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + E \cdot C_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 G \cdot J_f \quad \text{Ecuación 194}$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left[ \frac{3}{h_o} + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19 h_o}{60} + \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_o^3}{240} \right] \quad \text{Ecuación 195}$$

$k_{\phi}$  = Rigidez rotacional provista por un elemento de restricción (riostra, panel, tablero de cerramiento) a la unión aleta-alma de un miembro (cero si la aleta en compresión no está restringida). Si la rigidez rotacional proporcionada a las dos bridas es desigual, se utiliza la menor rigidez rotacional. Ecuación 196

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[ (x_{of} - h_{xf})^2 \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad \text{Ecuación 197}$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \frac{h_o t \pi^2}{13440} \left( \frac{145360(1-\xi_{web}) + 62160 \left[ \left( \frac{L}{h_o} \right)^2 + 448\pi^2 + \left( \frac{h_o}{L} \right)^2 \right] [53 + 3(1-\xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left( \frac{L}{h_o} \right)^2 + 420 \left( \frac{L}{h_o} \right)^4} \right) \quad \text{Ecuación 198}$$

$$\xi_{web} = \frac{(f_1 - f_2)}{f_1} f_1 \quad \text{Ecuación 199}$$

$\beta$  = valor que tiene en cuenta el gradiente de momento, el cual se permite que se tome de manera conservadora como 1. Ecuación 200

$$F_{crd} = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad \text{Ecuación 201}$$

$$M_{crd} = S_f F_{crd} \quad \text{Ecuación 202}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 203}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad \text{Ecuación 204}$$

$$\text{Si } \lambda_d \leq 0.673 \rightarrow M_{nd} = M_y \quad \text{Ecuación 205}$$

$$\text{Si } \lambda_d > 0.673 \rightarrow M_{nd} = \left[ 1 - 0.22 \left( \frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left( \frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad \text{Ecuación 206}$$

La resistencia de diseño en flexión para pandeo por distorsión, en elementos tipo Z se calcula, mediante la sección F4.1 de la especificación S100-16. Al igual que en los elementos C, esto se realiza por medio de las siguientes ecuaciones, en las cuales se involucran parámetros que son definidos en la determinación de la resistencia axial nominal para el pandeo por distorsión.

$$L_{crd} = \left\{ \frac{4\pi^4 h_o (1-\mu^2)}{t^3} \left[ I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \frac{\pi^4 h_o^4}{720} \right\}^{1/4} \quad \text{Ecuación 207}$$

$$k_{\phi fe} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \left[ E \cdot I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + E \cdot C_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 G \cdot J_f \quad \text{Ecuación 208}$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left[ \frac{3}{h_o} + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19 h_o}{60} + \left( \frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_o^3}{240} \right] \quad \text{Ecuación 209}$$

$k_{\phi}$  = Rigidez rotacional provista por un elemento de restricción (riostra, panel, tablero de cerramiento) a la unión aleta-alma de un miembro (cero si la aleta en compresión no está restringida). Si la rigidez rotacional proporcionada a las dos bridas es desigual, se utiliza la menor rigidez rotacional. Ecuación 210

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[ (x_{of} - h_{xf})^2 \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of} (x_{of} - h_{xf}) \left( \frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} \quad \text{Ecuación 211}$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \frac{h_o t \pi^2}{13440} \left\{ \frac{[45360(1-\xi_{web}) + 62160] \left( \frac{L}{h_o} \right)^2 + 448\pi^2 + \left( \frac{h_o}{L} \right)^2 [53 + 3(1-\xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left( \frac{L}{h_o} \right)^2 + 420 \left( \frac{L}{h_o} \right)^4} \right\} \quad \text{Ecuación 212}$$

$$\xi_{web} = \frac{(f_1 - f_2)}{f_1} f_1 \quad \text{Ecuación 213}$$

$\beta$  = valor que tiene en cuenta el gradiente de momento, el cual se permite que se tome de manera conservadora como 1. Ecuación 214

$$F_{crd} = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad \text{Ecuación 215}$$

$$M_{crd} = S_f F_{crd} \quad \text{Ecuación 216}$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad \text{Ecuación 217}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad \text{Ecuación 218}$$

$$\text{Si } \lambda_d \leq 0.673 \rightarrow M_{nd} = M_y \quad \text{Ecuación 219}$$

$$\text{Si } \lambda_d > 0.673 \rightarrow M_{nd} = \left[ 1 - 0.22 \left( \frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left( \frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad \text{Ecuación 220}$$

## 1.6.4 Capacidad a cortante

Para calcular la capacidad de un elemento laminado frío que es sometido a un esfuerzo cortante, la especificación S100-2016 proporciona en el capítulo G2 parámetros para determinar la resistencia al corte de almas sin agujeros, así como también proporcional el capítulo G5 con el cual se puede determinar la resistencia nominal al aplastamiento del alma.

La resistencia al corte en elementos sin rigidizadores se puede calcular de la siguiente forma:

$$\phi_v = 0.95 \quad \text{Ecuación 221}$$

$$A_w = h t \quad \text{Ecuación 222}$$

$$k_v = \text{Coeficiente de pandeo de la placa, según figura 5.} \quad \text{Ecuación 223}$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E k_v}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad \text{Ecuación 224}$$

$$V_{cr} = A_w F_{cr} \quad \text{Ecuación 225}$$

$$V_y = 0.6 A_w F_y \quad \text{Ecuación 226}$$

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{V_y}{V_{cr}}} \quad \text{Ecuación 227}$$

$$\text{Si } \lambda_v \leq 0.815 \rightarrow V_n = V_y \quad \text{Ecuación 228}$$

$$\text{Si } 0.815 < \lambda_v \leq 1.227 \rightarrow V_n = 0.815 \sqrt{V_{cr} V_y} \quad \text{Ecuación 229}$$

$$\text{Si } \lambda_v > 1.227 \rightarrow V_n = 0.904 E k_v t^3 / h \quad \text{Ecuación 230}$$

La resistencia nominal al aplastamiento del alma se determina de acuerdo con los siguientes parámetros:

$$\phi_w = \text{Según la tabla 2, 3 o 4.} \quad \text{Ecuación 231}$$

$$C = \text{Coeficiente de la tabla 2, 3 o 4.} \quad \text{Ecuación 232}$$

$\theta = \text{Ángulo entre el plano del alma y el plano de la superficie de apoyo, } 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ. \text{Ecuación 233}$

$$C_R = \text{Coeficiente del radio de dobles según la tabla 2, 3 o 4.} \quad \text{Ecuación 234}$$

$$C_N = \text{Coeficiente de longitud de apoyo de la carga, según la tabla 2, 3 o 4.} \quad \text{Ecuación 235}$$

$$C_h = \text{Coeficiente de esbeltez del alma, según la tabla 2, 3 o 4.} \quad \text{Ecuación 236}$$

$$N = \text{Longitud de apoyo de carga (mínimo 19 mm)} \quad \text{Ecuación 237}$$

$$P_n = C t^2 F_y \sin \theta \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}}\right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}}\right) \quad \text{Ecuación 238}$$

**Tabla 2.** Factores de resistencia y coeficientes para secciones canal con almas sencillas y secciones C

Support and Flange Conditions		Load Cases		C	C <sub>R</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>h</sub>	USA and Mexico		Canada LSD $\phi_w$	Limits
								ASD	LRFD		
								$\Omega_w$	$\phi_w$		
Fastened to Support	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 9
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	R/t ≤ 5
		Two-Flange Loading or Reaction	End	7.5	0.08	0.12	0.048	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 12
			Interior	20	0.10	0.08	0.031	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 12 d <sup>1</sup> ≥ 4.5 in. (110 mm)
Unfastened	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.85	0.80	0.70	R/t ≤ 5
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	
		Two-Flange Loading or Reaction	End	13	0.32	0.05	0.04	1.65	0.90	0.80	R/t ≤ 3
			Interior	24	0.52	0.15	0.001	1.90	0.80	0.65	
	Unstiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.40	0.60	0.03	1.80	0.85	0.70	R/t ≤ 2
			Interior	13	0.32	0.10	0.01	1.80	0.85	0.70	R/t ≤ 1
		Two-Flange Loading or Reaction	End	2	0.11	0.37	0.01	2.00	0.75	0.65	R/t ≤ 1
			Interior	13	0.47	0.25	0.04	1.90	0.80	0.65	

Note: <sup>1</sup>d = Out-to-out depth of section in the plane of the web

Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016.

Nota: Según la especificación S100-16 (AISI, 2016b), la tabla 2 solo aplica para secciones C y canales de alma simple donde  $h/t \leq 200$ ,  $N/t \leq 210$ ,  $N/h \leq 2,0$  y  $\theta = 90^\circ$ , para cargas sobre las dos aletas sujetas al apoyo, la distancia desde el borde del apoyo de la carga al extremo del miembro se extenderá al menos 2,5h, para casos de aletas no sujetas, la distancia desde el borde del apoyo de la carga al extremo del miembro se extenderá al menos 1,5h.

**Tabla 3.** Factores de resistencia y coeficientes para secciones Z con almas sencillas.

Support and Flange Conditions		Load Cases		C	C <sub>R</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>h</sub>	USA and Mexico		Canada LSD $\phi_w$	Limits
								ASD $\Omega_w$	LRFD $\phi_w$		
Fastened to Support	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 9
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	R/t ≤ 5
		Two-Flange Loading or Reaction	End	7.5	0.08	0.12	0.048	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 12
			Interior	20	0.10	0.08	0.031	1.75	0.85	0.75	R/t ≤ 12 d <sup>3</sup> ≥ 4.5 in. (110 mm)
Unfastened	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.85	0.80	0.70	R/t ≤ 5
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	
		Two-Flange Loading or Reaction	End	13	0.32	0.05	0.04	1.65	0.90	0.80	R/t ≤ 3
			Interior	24	0.52	0.15	0.001	1.90	0.80	0.65	
	Unstiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.40	0.60	0.03	1.80	0.85	0.70	R/t ≤ 2
			Interior	13	0.32	0.10	0.01	1.80	0.85	0.70	R/t ≤ 1
		Two-Flange Loading or Reaction	End	2	0.11	0.37	0.01	2.00	0.75	0.65	R/t ≤ 1
			Interior	13	0.47	0.25	0.04	1.90	0.80	0.65	

Note: <sup>1</sup> d = Out-to-out depth of section in the plane of the web

Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016.

Nota: Según la especificación S100-16 (AISI, 2016b), la tabla 3 solo aplica para secciones Z con almas sencillas donde  $h/t \leq 200$ ,  $N/t \leq 210$ ,  $N/h \leq 2.0$  y  $\theta = 90^\circ$ , para cargas sobre las dos aletas sujetas al apoyo, la distancia desde el borde del apoyo de la carga al extremo del miembro se extenderá al menos 2,5h, para casos de aletas no sujetas, la distancia desde el borde del apoyo de la carga al extremo del miembro se extenderá al menos 1,5h.

**Tabla 4.** Factores de resistencia y coeficientes para secciones de almas múltiples.

Support Conditions	Load Cases		C	C <sub>R</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>h</sub>	USA and Mexico		Canada LSD $\phi_w$	Limits
							ASD $\Omega_w$	LRFD $\phi_w$		
Fastened to Support	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.04	0.25	0.025	1.70	0.90	0.80	R/t ≤ 20
		Interior	8	0.10	0.17	0.004	1.75	0.85	0.75	
	Two-Flange Loading or Reaction	End	9	0.12	0.14	0.040	1.80	0.85	0.70	R/t ≤ 10
		Interior	10	0.11	0.21	0.020	1.75	0.85	0.75	
Unfastened	One-Flange Loading or Reaction	End	3	0.04	0.29	0.028	2.45	0.60	0.50	R/t ≤ 20
		Interior	8	0.10	0.17	0.004	1.75	0.85	0.75	
	Two-Flange Loading or Reaction	End	6	0.16	0.15	0.050	1.65	0.90	0.80	R/t ≤ 5
		Interior	17	0.10	0.10	0.046	1.65	0.90	0.80	

Note: Multi-*web* deck sections are considered unfastened for any support fastener spacing greater than 18 in. (460 mm).

Fuente: American Iron and Steel Institute, 2016.

Nota: Según la especificación S100-16 (AISI, 2016b), la tabla 4 solo aplica para secciones de almas múltiples donde  $h/t \leq 200$ ,  $N/t \leq 210$ ,  $N/h \leq 3$  y  $\theta = 45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ .

# 1.7 Interacción de fuerzas

Los siguientes procedimientos para evaluar los elementos bajo fuerzas combinadas son tomados de la especificación S100-2016 (AISI, 2016b) y siguen los métodos de Resistencia Directa y LRFD. Estos procedimientos abordan elementos sujetos a carga axial y flexión combinadas, la combinación de flexión y cortante, así como la combinación de flexión y aplastamiento del alma.

## 1.7.1 Combinación de carga axial y flexión

De acuerdo con la sección H.1 de la especificación S100-2016 (AISI, 2016b), la combinación de cargas en tensión y flexión deben satisfacer las ecuaciones 239 y 240 mientras, que la combinación de cargas en compresión y flexión deben satisfacer la ecuación 241.

$$\frac{\bar{M}_x}{M_{axt}} + \frac{\bar{M}_y}{M_{ayt}} + \frac{\bar{T}}{T_a} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 239}$$

$$\frac{\bar{M}_x}{M_{ax}} + \frac{\bar{M}_y}{M_{ay}} - \frac{\bar{T}}{T_a} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 240}$$

$$\frac{\bar{P}}{P_a} + \frac{\bar{M}_x}{M_{ax}} + \frac{\bar{M}_y}{M_{ay}} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 241}$$

## 1.7.2 Combinación de flexión y cortante

Para vigas sin rigidizadores de cortante que se encuentran bajo la influencia de fuerzas combinadas de flexión y cortante, la especificación S100-2016 (AISI, 2016b), en la sección H2, establece que la siguiente ecuación debe cumplirse:

$$\sqrt{\left(\frac{\bar{M}}{M_{a\ell o}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{V}}{V_a}\right)^2} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 242}$$

## 1.7.3 Combinación de flexión y aplastamiento del alma.

Según la especificación S100-2016 (AISI, 2016b), las almas simples no reforzadas y sujetas a una combinación de flexión y carga o reacción concentrada se deben diseñar de tal forma que se satisfaga la siguiente ecuación:

$$0.91 \left(\frac{\bar{P}}{P_n}\right) + \left(\frac{\bar{M}}{M_{n\ell o}}\right) \leq 1.33\phi \quad \text{Ecuación 243}$$

Donde:

$$\phi = 0.90$$

*Ecuación 244*

Nota: En los apoyos interiores de luces continuas, la ecuación 243 no es aplicable a tableros metálicos o vigas con dos o más almas sencillas, cuando los bordes en compresión de las almas adyacentes sean apoyados lateralmente, en la región de momentos negativos por elementos de continuos o intermitentes conectados a la aleta, revestimientos rígidos o sistemas de arriostramiento lateral, y el espaciamiento entre las almas adyacentes no excedan las 10 pulgadas (254 mm).

## 1.8 Incremento en el punto de fluencia

De acuerdo con la especificación S100-2016 (AISI, 2016b), el conformado en frío aumenta la resistencia de fluencia del material, este incremento se puede utilizar en cálculos específicos. Las limitaciones y los métodos de determinación del esfuerzo de fluencia ( $F_{ya}$ ) descritos por la especificación son los siguientes:

- a) El esfuerzo de fluencia del acero se debe determinar, con base en los siguientes métodos:
  1. Ensayos de tracción de sección completa.
  2. Ensayos sobre columnas cortas
  3. Calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_{ya} = C \cdot F_{yc} + (1 - C)F_{uv} \leq F_{uv}$$

*Ecuación 245*

- b) Para miembros en tensión axialmente cargados el punto de fluencia del acero será determinado ya sea por el método 1 o por el método 3 descritos en la sección anterior (a).
- c) El efecto de la soldadura sobre las propiedades mecánicas de un elemento se determinará, con base en ensayos sobre probetas de sección completa que contengan, dentro de la longitud testigo, el tipo de soldadura que el fabricante pretenda utilizar.

# Capítulo 2: Metodología

## 2.1 Investigación

Para llevar a cabo el proyecto, en primera instancia, se realizó una investigación exhaustiva y una revisión de literatura técnica relacionada con el diseño de los elementos estructurales laminados en frío, la cual se presenta en el marco teórico. A partir de esta investigación, se recopilan las hojas de cálculo disponibles en la empresa utilizadas para el diseño de los elementos laminados en frío. Además, se aplicaron consultas verbales a los profesionales de la empresa. Todo esto se efectuó con el propósito de determinar los requisitos bajo los cuales debe operar el procedimiento estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío y, de esta manera, definir los criterios del sistema para determinar la alternativa más apropiada para el desarrollo de este proyecto.

## 2.2 Desarrollo de la herramienta

De acuerdo con la investigación se determina que la alternativa más apropiada para desarrollar este proyecto corresponde al software Excel dado que es ampliamente conocido por todos los colaboradores de la empresa y permite llevar a cabo los cálculos necesarios por el proyecto. Una vez definida la herramienta por utilizar, se procede a programar los cálculos de las propiedades geométricas detalladas en el apartado 1.5 del marco teórico. Estos cálculos se implementan en diferentes hojas de cálculo, correspondientes a los diferentes elementos laminados en frío. El propósito de esta implementación es garantizar que el procedimiento de cálculo no dependa de bases de datos exclusivas de algunos proveedores, lo que aumenta la independencia y versatilidad de la herramienta.

En las diferentes hojas de cálculo, se programan las fórmulas y funciones necesarias para calcular las diferentes propiedades geométricas, como el área de la sección transversal, el momento de inercia, el módulo de sección, entre otras propiedades. Una vez programados estos cálculos, se llevan a cabo pruebas comparativas utilizando diversos artículos científicos y fichas técnicas para verificar que el procedimiento de cálculo produce resultados precisos y confiables. Cualquier error o discrepancia identificado durante esta etapa se corrige de manera oportuna y rigurosa.

Luego de calcular las propiedades geométricas para cada elemento, se procede a desarrollar los cálculos de diseño, siguiendo lo especificado en el apartado 1.6 del marco teórico. Estas hojas de cálculo contienen las fórmulas y funciones definidas en la especificación S-100-2016 del AISI para el diseño de elementos laminados en frío utilizando tanto el método Resistencia Directa como el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD), este último conforme a lo establecido por el Código Sísmico de Costa Rica. De esta forma se obtienen todos los cálculos requeridos para el diseño de los perfiles laminados en frío, tipo C, Z y tubulares.

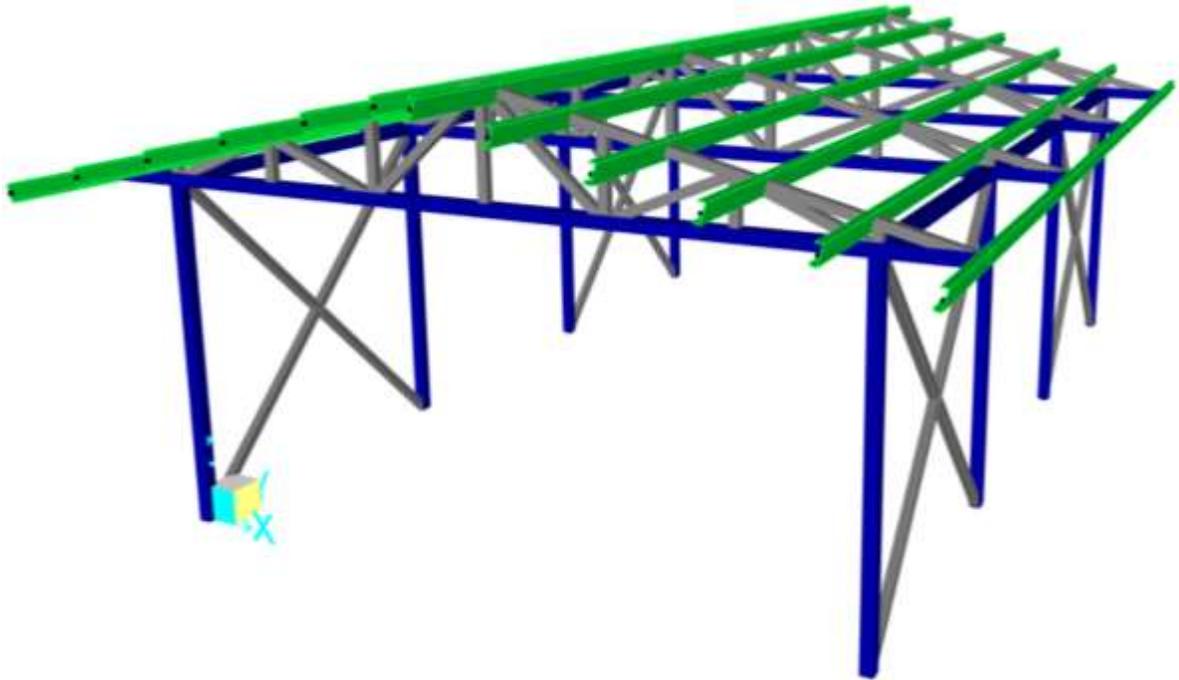
Es importante destacar que, en la programación de las hojas electrónicas, se optó por no aplicar el incremento de la resistencia de fluencia del material al ser conformado en frío. Esta decisión se basa en una

de las limitaciones establecidas por la especificación S100-2016 para el uso del incremento del esfuerzo de fluencia. La especificación requiere que se considere el efecto de la soldadura sobre las propiedades mecánicas del elemento mediante ensayos sobre probetas de sección completa que contengan, dentro de la longitud testigo, el tipo de soldadura que el fabricante pretenda utilizar. Por lo tanto, al desarrollar el procedimiento estandarizado de cálculo, se decide no incrementar este esfuerzo de fluencia y mantener un enfoque conservador con el propósito de minimizar el riesgo de error de diseño y garantizar la seguridad de la estructura.

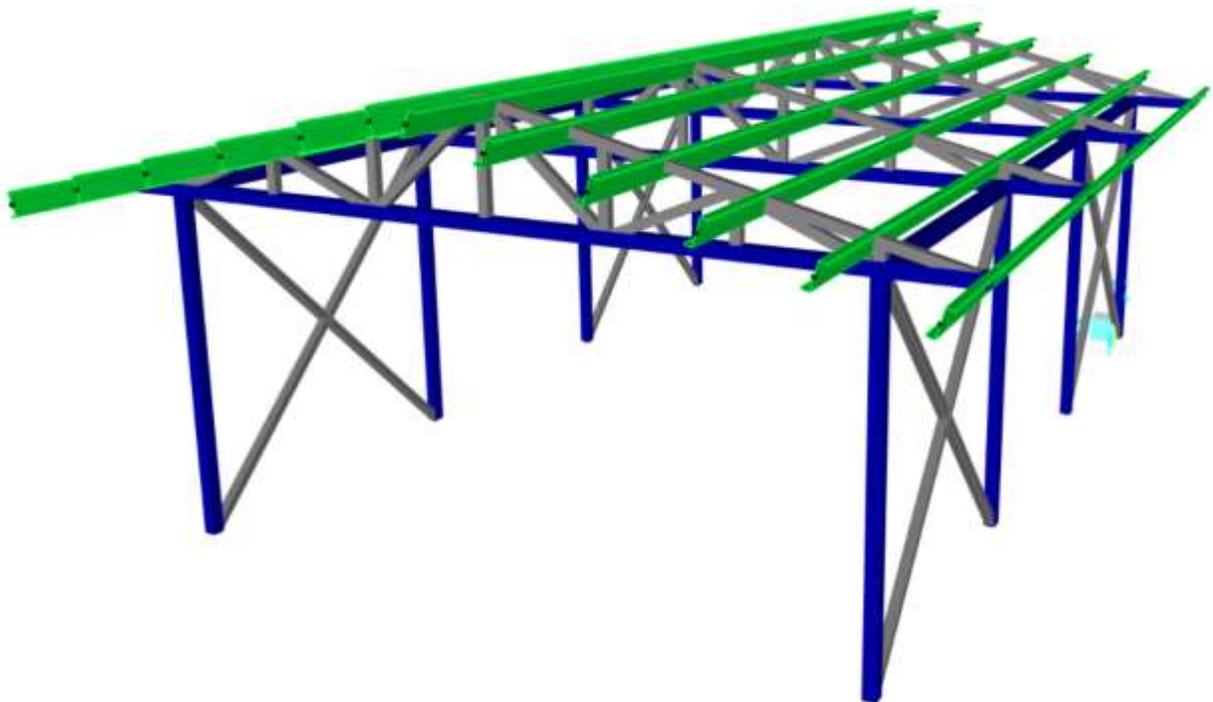
A partir de la misma metodología empleada para revisar la programación de las propiedades geométricas, se realiza una exhaustiva revisión del apartado de cálculos de diseño en cada hoja de cálculo. En esta revisión se utilizan artículos científicos, cálculos realizados de forma manual, así como también software especializado en el cálculo de estructuras con materiales laminados en frío, como es el caso del software SAP 2000, en el cual se desarrolla un modelo estructural. Lo anterior con el objetivo de asegurar que el procedimiento de cálculo genera resultados precisos y confiables.

## **2.3 Desarrollo de un modelo estructural**

En el programa SAP 2000 Ultimate, se desarrolla un modelo estructural teórico con un área de 54 metros cuadrados. Este modelo consta de ocho columnas, cada una compuesta por una sección de 100 x 100 x 2,37 mm. Además, se incorporan vigas de amarre que completan los marcos estructurales y que también tienen la misma sección que se emplea en las columnas. El modelo incluye cuatro cerchas en las cuales se utiliza una sección de 72 x 72 x 2.17 mm, cuya cuerda inferior corresponde a la viga de amarre especificada. En cuando a los clavadores, se generan dos modelos, en el primero se utilizan clavadores tipo C con una sección de 150 x 50 x 15 x 3,17 mm. En el segundo modelo, se utilizan elementos tipo Z con una sección de 200 x 50 x 15 x 2,37 mm. Adicionalmente, se incorporan arriostres para proporcionar una mayor estabilidad a la estructura con elementos tubulares cuya sección corresponde a la misma que se utiliza en las cerchas (72 x 72 x 2.17 mm). Es importante destacar que tanto los clavadores tipo C como los clavadores tipo Z se encuentran rotados 13,50°, respecto de los ejes locales del programa, lo cual corresponde a la posición en la cual su base se encuentra totalmente apoyada sobre la cuerda superior de las cerchas, dado que el techo del modelo presenta una pendiente del 24%. Por último, se asume un sitio de cimentación de categoría S3 y una clasificación de zona sísmica III. En las figuras 17 y 18 se muestran los modelos especificados.



**Figura 17.** *Modelo estructural con clavadores tipo C.*  
Fuente: Computers and Structures, s.f.



**Figura 18.** *Modelo estructural con clavadores tipo Z.*  
Fuente: Computers and Structures, s.f.

## 2.4 Guía de uso del procedimiento estandarizado

Después de verificar la funcionalidad adecuada de la herramienta de diseño para elementos laminados en frío, se procedió a desarrollar una guía de uso con el propósito de proporcionar instrucciones detalladas y claras para llevar a cabo el procedimiento de cálculo estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío. En esta guía se detalla el contenido de las cuatro hojas de cálculo que conforman cada uno de los procedimientos de diseño, así como la manera correcta de hacer uso de esta. La Figura 19 muestra la portada de la guía, y una copia de esta, se adjunta en el apéndice 1.



Figura 19. Portada de la guía de uso del procedimiento estandarizado.

# Capítulo 3: Resultados y análisis

## 3.1 Resultados

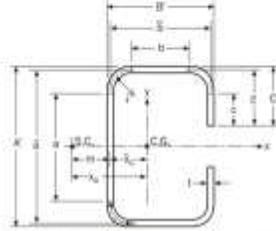
En este apartado se presenta la herramienta de cálculo que permite el diseño estandarizado de los elementos laminados en frío, así como los resultados obtenidos de esta en cada uno de sus apartados. Estos resultados abarcan las propiedades geométricas de los elementos, la capacidad de estos y las interacciones de fuerzas.

### 3.1.1 Herramienta de cálculo

La herramienta desarrollada consta de cuatro hojas de cálculo. La primera se titula: *Entrada y Salida de Datos*, en esta hoja se ingresan las propiedades del material y del elemento propuesto para el diseño, y se muestran todos los resultados de los cálculos realizados por la herramienta. La segunda hoja se llama *Hoja de Cálculo* en la que se llevan a cabo de manera detallada todos los cálculos relacionados con la capacidad del elemento evaluado. En cuanto a la tercera hoja, *Resistencias Requeridas*, permite el ingreso de los datos de las fuerzas a las que se someten los diferentes elementos de la estructura por diseñar, con el fin de realizar los cálculos de interacción de fuerzas y verificar que el diseño cumple con las demandas del proyecto. Por último, se encuentra la hoja de cálculo llamada *Perfiles*, que corresponde a una base de datos que almacena las propiedades básicas de cada elemento. Esta base de datos facilita el diseño, a través de un menú de acceso rápido que simplifica la introducción de las propiedades básicas de diferentes perfiles. La Figura 20 ejemplifica los tres procedimientos de diseño desarrollados en este proyecto. Además, en la sección de apéndice 2 se proporciona un detalle completo de cada una de las hojas de cálculo que integran la herramienta desarrollada.

	PROYECTO:	Realizado por: Ing.
		Revisado por: Ing.
<b>Diseño de secciones tipo C laminadas en frío según el AISI S100-16</b>		

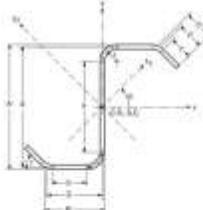
Propiedades del material	Comentarios
$E = 2100000$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del acero
$G = 807692.308$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de corte de acero
$\mu = 0.3$	Relación de Poisson del acero
$F_u = 2314$ kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero según
$F_u = 3160$ kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción del acero según

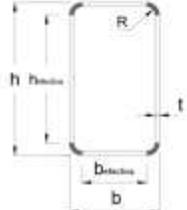
Propiedades del elemento	Comentarios
	
<b>Diseño de secciones tipo Z laminadas en frío según el AISI S100-16</b>	
Propiedades del material	Comentarios
$E = 2100000.0$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del acero
$G = 807692.3$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de corte de acero
$\mu = 0.3$	Relación de Poisson del acero
$F_u = 2314.0$ kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero según
$F_u = 3160.0$ kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción del acero según
Propiedades del elemento	Comentarios

Entrada y Salida de Datos Hoja de Cálculo Herramientas Requeridas

	PROYECTO:	Realizado por: Ing.
		Revisado por: Ing.
<b>Diseño de secciones tubulares laminadas en frío según el AISI S100-16</b>		

Propiedades del material	Comentarios
$E = 2100000$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del acero
$G = 807692.31$ kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de corte de acero
$\mu = 0.3$	Relación de Poisson del acero
$F_u = 2314$ kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero según
$F_u = 3160$ kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción del acero según

Propiedades del elemento	Comentarios
	

Propiedades del elemento	Comentarios
	

Entrada y Salida de Datos Hoja de Cálculo Herramientas Requeridas Herramientas

Figura 20. Interfaz de las herramientas de cálculo.

### 3.1.2 Propiedades geométricas de elementos tubulares

Para verificar que el procedimiento de cálculo de las propiedades geométricas de los elementos tubulares se procede a realizar una comparación entre los resultados obtenidos por Romanjek (2013a), en el artículo propiedades y capacidades de los tubos estructurales laminados en frío y producidos en Costa Rica, y una ficha técnica de la empresa Metalco, S. A. para tubos estructurales.

**Tabla 9.** Comparación de propiedades geométricas para un elemento de 7.2x7.2x0.120 cm.

7,2x7,2x0,120	Hoja de cálculo	Romanjek (2013a)	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	3,34	3,34	0,00%
$I_{xx}=I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	27,60	27,60	0,00%
$S_x=S_y$ (cm <sup>3</sup> ) =	7,67	7,67	0,00%
$r_x=r_x$ (cm) =	2,88	2,88	0,00%

**Tabla 10.** Comparación de propiedades geométricas para un elemento de 15x5x0.150 cm.

15x15x1,50	Hoja de cálculo	Metalco, S. A. (s.f).	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	5,813	5,810	0,06%
$I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> ) =	156,673	156,690	0,01%
$I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	28,454	28,470	0,05%
$S_x$ (cm <sup>3</sup> ) =	20,890	20,890	0,00%
$S_y$ (cm <sup>3</sup> ) =	11,382	11,390	0,07%
$r_x$ (cm) =	5,191	5,190	0,03%
$r_y$ (cm) =	2,212	2,210	0,09%
$J$ (cm <sup>4</sup> ) =	80,040	80,040	0,00%

### 3.1.3 Propiedades geométricas de elementos tipo C

Con el propósito de verificar los resultados de las propiedades geométricas de los elementos tipo C, se utilizan las características de los elementos 12CS3.5x105 y 9CS2.5x105, las cuales se obtienen de la tabla I-1 del Manual AISI, 2013.

**Tabla 11.** Propiedades geométricas de los elementos 12CS4x105 y 9CS2.5x105.

Elemento	12CS3,5x105	9CS2.5x105
A' (in) =	12,000	9,000
B' (in) =	3,500	2,500
C' (in) =	0,885	0,885
t (in) =	0,105	0,105
R (in) =	0,188	0,188
A <sub>g</sub> (in <sup>2</sup> ) =	2,09	1,57
I <sub>xx</sub> (in <sup>4</sup> ) =	43,80	18,10
I <sub>yy</sub> (in <sup>4</sup> ) =	3,07	1,24
S <sub>x</sub> (in <sup>3</sup> ) =	7,29	4,02
S <sub>y,min</sub> (in <sup>3</sup> ) =	1,17	0,68
r <sub>x</sub> (in) =	4,57	3,40
r <sub>y</sub> (in) =	1,21	0,89
J (in <sup>4</sup> ) =	0,00769	0,00576
C <sub>w</sub> (in <sup>6</sup> ) =	89,10	21,50
r <sub>0</sub> (in) =	5,23	3,89
x <sub>0</sub> (in) =	-2,23	-1,68

Fuente: American Iron and Steel Institute, 2013.

Con los datos de la tabla 11, se procede a calcular los elementos mediante la hoja de cálculo, pero con la conversión de unidades respectivas, para las cuales fue diseñada la hoja de cálculo.

**Tabla 12.** Comparación de propiedades geométricas para el elemento 12CS3.5x105.

12CS4x105	Hoja de cálculo	Manual AISI (2013)	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	13,506	13,484	0,17%
$I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> ) =	1821,610	1823,094	0,08%
$I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	127,745	127,783	0,03%
$S_x$ (cm <sup>3</sup> ) =	119,528	119,462	0,06%
$S_{y,min}$ (cm <sup>3</sup> ) =	19,189	19,173	0,08%
$r_x$ (cm) =	11,613	11,608	0,05%
$r_y$ (cm) =	3,075	3,073	0,07%
$J$ (cm <sup>4</sup> ) =	0,32023	0,32008	0,05%
$C_w$ (cm <sup>6</sup> ) =	23937,130	23926,546	0,04%
$r_0$ (cm) =	13,284	13,284	0,00%
$x_0$ (cm) =	-5,667	-5,664	0,05%

**Tabla 13.** Comparación de propiedades geométricas para el elemento 9CS2.5x105.

9CS2.5x105	Hoja de cálculo	Manual AISI (2013)	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	10,119	10,129	0,10%
$I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> ) =	753,011	753,379	0,05%
$I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	51,511	51,613	0,20%
$S_x$ (cm <sup>3</sup> ) =	65,880	65,876	0,01%
$S_{y,min}$ (cm <sup>3</sup> ) =	11,084	11,078	0,06%
$r_x$ (cm) =	8,626	8,636	0,12%
$r_y$ (cm) =	2,256	2,256	0,02%
$J$ (cm <sup>4</sup> ) =	0,23992	0,240	0,07%
$C_w$ (cm <sup>6</sup> ) =	5771,779	5773,521	0,03%
$r_0$ (cm) =	9,883	9,881	0,02%
$x_0$ (cm) =	-4,262	-4,267	0,11%

### 3.1.4 Propiedades geométricas de elementos tipo Z

Con el propósito de verificar los resultados de las propiedades geométricas de los elementos tipo C, se utilizan las características de los elementos 8ZS2.25x059 y 12ZS3.25x085, las cuales se obtienen de la tabla I-4 del Manual AISI, 2013.

**Tabla 14.** Propiedades geométricas de los elementos 8ZS2.25x059 y 12ZS3.25x085.

Elemento	8ZS2.25x059	12ZS3.25x085
A' (in) =	8,000	12,000
B' (in) =	2,250	3,250
C' (in) =	0,910	0,960
t (in) =	0,059	0,085
R (in) =	0,188	0,188
Y (°) =	50,00	50,00
A <sub>g</sub> (in <sup>2</sup> ) =	0,82	1,70
I <sub>xx</sub> (in <sup>4</sup> ) =	7,76	35,50
I <sub>yy</sub> (in <sup>4</sup> ) =	1,08	3,75
S <sub>x</sub> (in <sup>3</sup> ) =	1,940	5,920
S <sub>y</sub> (in <sup>3</sup> ) =	0,384	0,982
r <sub>x</sub> (in) =	3,070	4,580
r <sub>y</sub> (in) =	1,140	1,490
J (in <sup>4</sup> ) =	0,001	0,004
C <sub>w</sub> (in <sup>6</sup> ) =	12,65	98,60

De la misma manera que se realizó para los elementos tipo C, se procede a calcular las propiedades geométricas de los miembros de la tabla 14 mediante la hoja de cálculo, pero con la conversión de unidades respectivas para las cuales fue diseñada esta.

**Tabla 15.** Comparación de propiedades geométricas para el elemento 8ZS2.25x059.

8ZS2.25x059	Hoja de cálculo	Manual AISI (2013)	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	5,304	5,303	0,01%
$I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> ) =	323,094	322,996	0,03%
$I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	44,791	44,953	0,36%
$S_x$ (cm <sup>3</sup> ) =	31,801	31,791	0,03%
$S_y$ (cm <sup>3</sup> ) =	6,286	6,293	0,11%
$r_x$ (cm) =	7,805	7,798	0,09%
$r_y$ (cm) =	2,906	2,896	0,36%
$J$ (cm <sup>4</sup> ) =	0,03971	0,03971	0,01%
$C_w$ (cm <sup>6</sup> ) =	3397,103	3396,979	0,00%

**Tabla 16.** Comparación de propiedades geométricas para el elemento 12ZS3.25x085.

12ZS3.25x085	Hoja de cálculo	Manual AISI (2013)	%Diferencia
$A_g$ (cm <sup>2</sup> ) =	10,938	10,968	0,27%
$I_{xx}$ (cm <sup>4</sup> ) =	1479,607	1477,622	0,13%
$I_{yy}$ (cm <sup>4</sup> ) =	156,607	156,087	0,33%
$S_x$ (cm <sup>3</sup> ) =	97,087	97,011	0,08%
$S_y$ (cm <sup>3</sup> ) =	16,121	16,092	0,18%
$r_x$ (cm) =	11,631	11,633	0,02%
$r_y$ (cm) =	3,784	3,785	0,02%
$J$ (cm <sup>4</sup> ) =	0,16995	0,170	0,07%
$C_w$ (cm <sup>6</sup> ) =	26551,302	26477,636	0,28%

### 3.1.5 Capacidad de elementos tubulares

Para evaluar los elementos tubulares, se utiliza el ejemplo 5.1 del Wei-Wen Yu (2020), el ejemplo II-9 del Manual de AISI (2013), resultados obtenidos por Romanjek (2013a), un cálculo realizado de forma manual, el cual se adjunta en el apéndice 3, y el modelo realizado en el software SAP 2000 Ultimate. Esto permite llevar a cabo las siguientes comparaciones:

**Tabla 17.** Comparación de resultados de resistencia de diseño en compresión.

	Hoja de cálculo	Wei-Wen Yu (2020)	%Diferencia
$P_{ne}$ (kg) =	23454,389	23450,603	0,02%
$P_{nl}$ (kg) =	35558,151	35588,671	0,09%

**Tabla 18.** Comparación de resultados de resistencia de diseño en flexión.

	Hoja de cálculo	Manual AISI (2013)	%Diferencia
$M_n$ (kg·cm) =	294849,947	262683,041	12,25%

**Tabla 19** Comparación de resultados de resistencia de diseño en flexión.

	Hoja de cálculo	Cálculo manual	%Diferencia
$M_n$ (kg·cm) =	294849,947	294835,316	0,00%

**Tabla 20.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a cortante.

	Hoja de cálculo	Romanjek (2013a)	%Diferencia
$V_n$ (kg) =	2159,953	2161,060	0,05%

**Tabla 21.** Comparación de los resultados de resistencia de diseño a través de software de análisis estructural.

Elemento: 100 x 100 x 2,37 mm			
	Hoja de cálculo	SAP 2000	%Diferencia
$\varphi T_n$ (kg) =	18773,07	18773,07	0,00%
$\varphi P_n$ (kg) =	4472,713	4471,338	0,03%
$\varphi M_n$ (kg·cm) =	58763,082	58751,001	0,02%
$\varphi V_n$ (kg) =	5362,936	5362,936	0,00%
Elemento: 72 x 72x 2,37 mm			
	Hoja de cálculo	SAP 2000	%Diferencia
$\varphi T_n$ (kg) =	13245,01	13245,01	0,00%
$\varphi P_n$ (kg) =	11947,55	11947,43	0,00%
$\varphi M_n$ (kg·cm) =	29082,18	29072,99	0,03%
$\varphi V_n$ (kg) =	3612,39	3612,39	0,00%

### 3.1.6 Capacidad de elementos tipo C

Para verificar que el procedimiento de cálculo de diseño de elementos tipo C produce resultados precisos y confiables se hace uso del ejemplo I del informe de investigación D100 del AISI (2021), así como también resultados obtenidos por Romanjek (2013b), para elementos tipo C, y los resultados obtenidos del modelo desarrollado en el software SAP 2000 Ultimate.

**Tabla 22.** Comparación de resultados de resistencia de diseño en compresión.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$P_{ne}$ (kg) =	21986,556	21999,115	0,06%
$P_{ni}$ (kg) =	8940,386	8935,723	0,05%
$P_{nd}$ (kg) =	8986,905	8981,082	0,06%

**Tabla 23.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a flexión alrededor de eje X.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$M_{ne}$ (kg·cm) =	145108,993	145166,944	0,04%
$M_{ni}$ (kg·cm) =	107901,893	107838,301	0,06%
$M_{nd}$ (kg·cm) =	106834,830	106686,182	0,14%

**Tabla 24.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a flexión alrededor del eje Y.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$M_{ne}$ (kg·cm) =	23820,012	23825,813	0,02%
$M_{ni}$ (kg·cm) =	23820,012	23825,813	0,02%
$M_{nd}$ (kg·cm) =	20740,824	20853,347	0,54%

**Tabla 25.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a cortante según Romanjek (2001).

	Hoja de cálculo	Romanjek (2013b)	%Diferencia
$V_{n,y}$ (kg) =	1145,786	1145,770	0,00%

**Tabla 26.** Comparación de los resultados de resistencia de diseño a través de software de análisis estructural.

Elemento: 150 x 50 x 15 x 3,17 mm			
	Hoja de cálculo	SAP 2000	%Diferencia
$\varphi T_n$ (kg) =	16749,81	16749,81	0,00%
$\varphi P_n$ (kg) =	3970,99	3970,99	0,00%
$\varphi M_{n,x}$ (kg·cm) =	48985,20	48994,96	0,02%
$\varphi M_{n,y}$ (kg·cm) =	12547,94	12547,94	0,00%
$\varphi V_{n,y}$ (kg) =	5476,49	5476,49	0,00%
$\varphi V_{n,x}$ (kg) =	2590,65	2590,65	0,00%

### 3.1.7 Capacidad de elementos tipo Z

Para comprobar la precisión y confiabilidad del procedimiento de cálculo de diseño de elementos tipo Z, se emplea el ejemplo III del informe de investigación D100 del AISI (2021), junto con los resultados obtenidos por Romanjek (2011), para elementos similares de tipo Z y el modelo desarrollado en el software SAP 2000 Ultimate.

**Tabla 27.** Comparación de resultados de resistencia de diseño en compresión según la especificación D100 del AISI.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$P_{ne}$ (kg) =	23454,389	23450,603	0,02%
$P_{nl}$ (kg) =	10246,022	10205,775	0,39%
$P_{nd}$ (kg) =	9911,909	9933,621	0,22%

**Tabla 28.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a flexión según la especificación D100 del AISI.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$M_{ne}$ (kg·cm) =	152446,203	152770,926	0,21%
$M_{nl}$ (kg·cm) =	115686,088	115787,919	0,09%
$M_{nd}$ (kg·cm) =	93310,107	93436,818	0,14%

**Tabla 29.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a flexión según la especificación D100 del AISI.

	Hoja de cálculo	AISI D100 (2021)	%Diferencia
$M_{ne}$ (kg·cm) =	42886,146	42858,812	0,06%
$M_{nl}$ (kg·cm) =	41524,380	41476,270	0,12%
$M_{nd}$ (kg·cm) =	28637,629	28572,541	0,23%

**Tabla 30.** Comparación de resultados de resistencia de diseño a cortante según Romanjek (2001).

	Hoja de cálculo	Romanjek (2011)	%Diferencia
$V_{n,y}$ (kg) =	926,647	926,606	0,00%

**Tabla 31.** Comparación de los resultados de resistencia de diseño a través de software de análisis estructural.

Elemento: 200 x 50 x 15 x 2,37 mm			
	Hoja de cálculo	SAP 2000	%Diferencia
$\varphi T_n$ (kg) =	15658,86	15658,86	0,00%
$\varphi P_n$ (kg) =	5719,33	5670,98	0,85%
$\varphi M_{n,x}$ (kg·cm) =	40260,44	40188,51	0,18%
$\varphi M_{n,y}$ (kg·cm) =	13029,00	13029,00	0,00%
$\varphi V_{n,2}$ (kg) =	5158,86	5158,86	0,00%
$\varphi V_{n,3}$ (kg) =	2474,19	2474,19	0,00%

### 3.1.8 Interacción de fuerzas (D/C)

Con el propósito de verificar la funcionalidad del procedimiento estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares bajo condiciones de fuerzas combinadas, se realiza una comparación entre los resultados de las distintas hojas de cálculo y los resultados que brinda el software SAP 2000 Ultimate, para el modelo desarrollado en este proyecto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a través de las hojas de cálculo, según las capacidades calculadas por el procedimiento de diseño y los esfuerzos obtenidos por el modelo desarrollado en el programa de diseño.

**Tabla 32.** Interacción de fuerzas en el elemento 100 x 100 x 2,37 mm.

Interacción 1	0,625	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 2	0,340	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 3	0,813	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión.
Interacción 4	0,813	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión.
Interacción 5	0,813	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión.
Interacción 6	0,813	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión.
Interacción 7	0,381	Flexión y cortantes combinados.
Interacción 8	0,587	Combinación de flexión y arrugado del alma.

**Tabla 33.** Interacción de fuerzas en el elemento 72 x 72 x 2,37 mm.

Interacción 1	0,475	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 2	0,458	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 3	0,805	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión.
Interacción 4	0,805	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión.
Interacción 5	0,790	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión.
Interacción 6	0,790	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión.
Interacción 7	0,473	Flexión y cortantes combinados.
Interacción 8	0,728	Combinación de flexión y arrugado del alma.

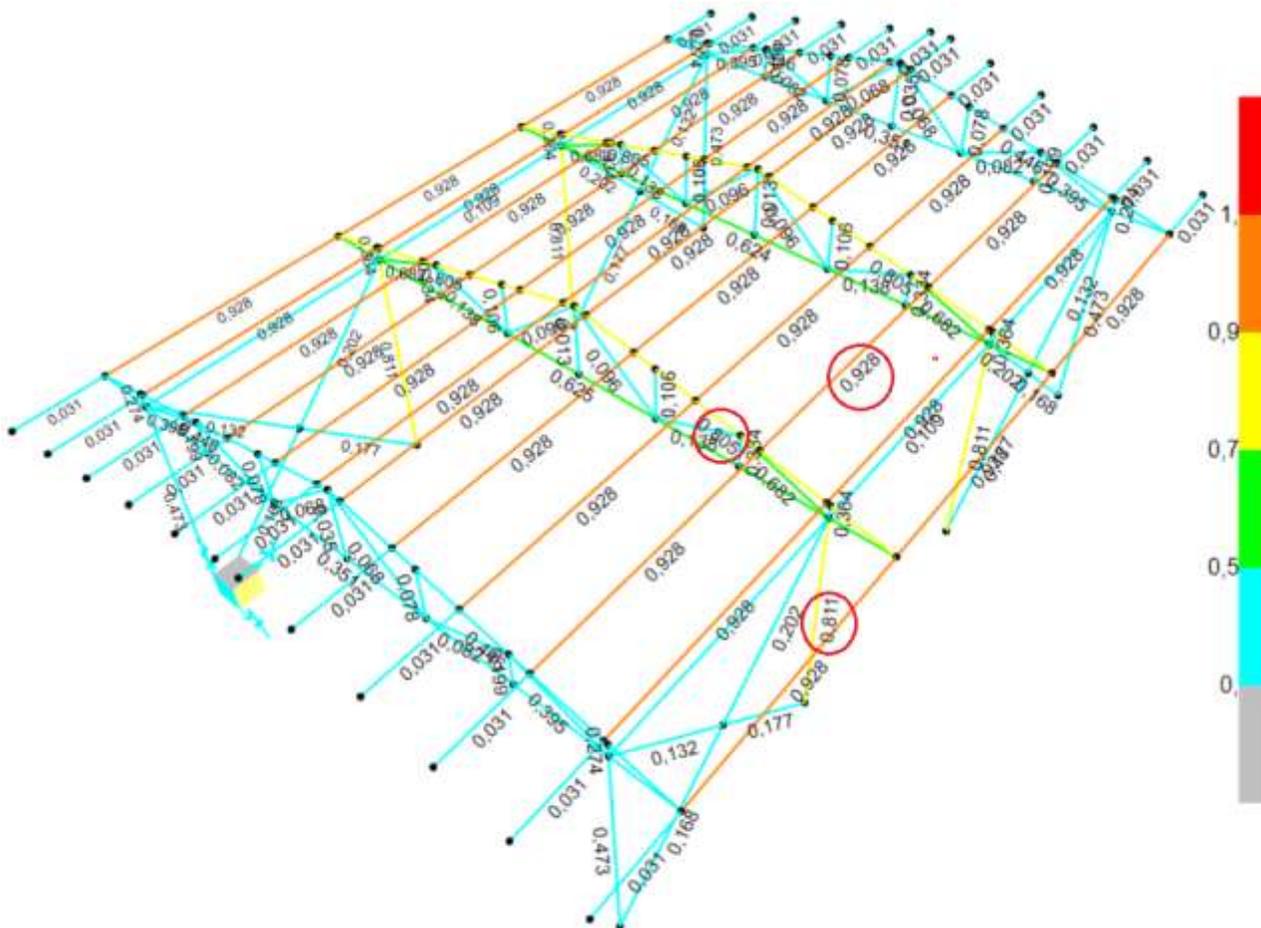
**Tabla 34.** Interacción de fuerzas en el elemento C 150 x 50 x 15 x 3.17 mm.

Interacción 1	0,763	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 2	0,928	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 3	0,928	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión.
Interacción 4	0,928	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión.
Interacción 5	0,928	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión.
Interacción 6	0,928	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión.
Interacción 7	0,310	Flexión y cortantes combinados.
Interacción 8	0,182	Combinación de flexión y arrugado del alma.

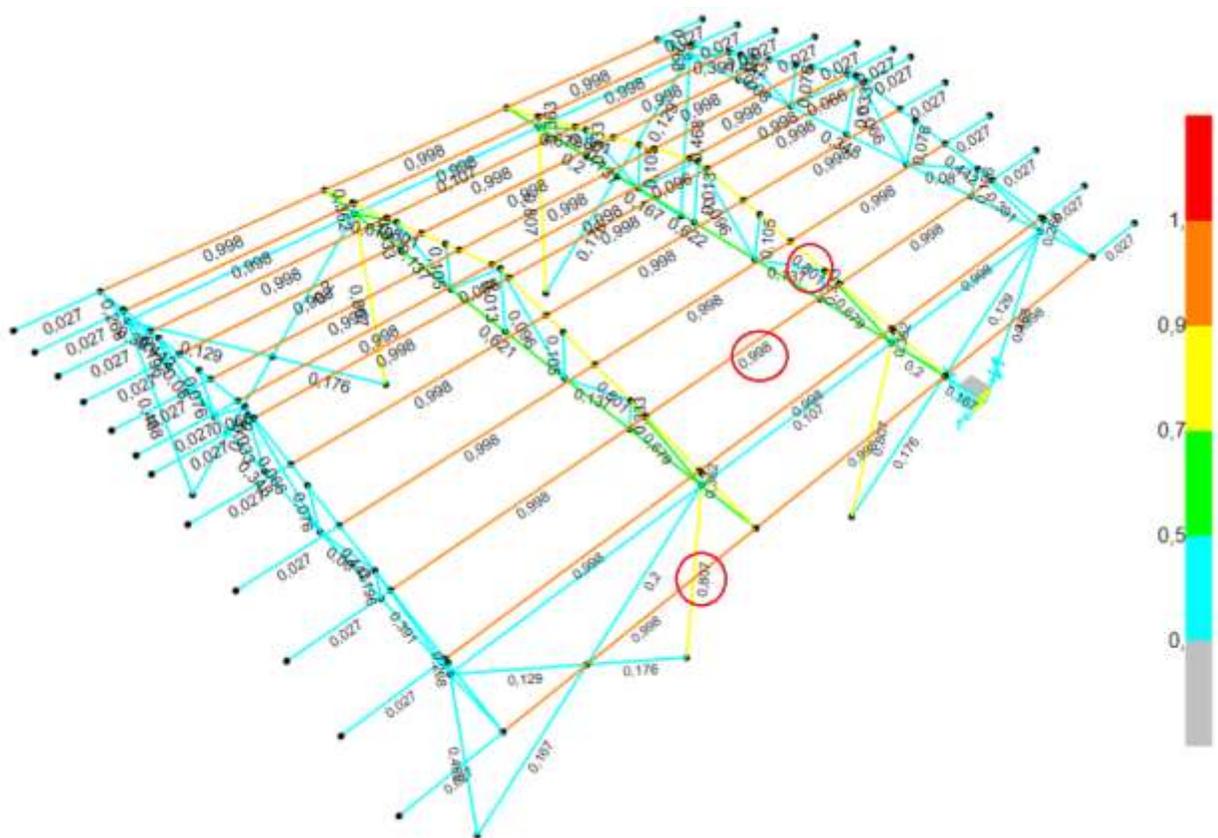
**Tabla 35.** Interacción de fuerzas en el elemento Z 200 x 50 x 15 x 2,37 mm.

Interacción 1	0,997	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 2	0,997	Flexión y carga axial en tracción combinadas.
Interacción 3	0,997	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión.
Interacción 4	0,997	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión.
Interacción 5	0,997	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión.
Interacción 6	0,997	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión.
Interacción 7	0,482	Flexión y cortante combinadas.
Interacción 8	0,717	Combinación de flexión y arrugado del alma.

En cuanto a los resultados de la interacción de esfuerzos que proporciona el software, estos se presentan en el apartado de anexos para cada perfil empleado en el modelo estructural. Adicionalmente, en este apartado se muestran los resultados de forma gráfica, mediante las figuras 21 y 22, y las fuerzas máximas para cada elemento se destacan con un círculo rojo.



**Figura 21.** Interacción de fuerzas en el modelo estructural con clavadores tipo C.  
Fuente: Computers and Structures, s.f.



**Figura 22.** Interacción de fuerzas en el modelo estructural con clavadores tipo Z.  
Fuente: Computers and Structures, s.f.

Con los datos de las interacciones de fuerzas obtenidas, a través de las hojas de cálculo programadas y los resultados de las interacciones obtenidas mediante el software, se procede a realizar la comparación que se muestra en la tabla 36. Para evaluar los elementos tubulares y tipo C, se utiliza el modelo de la figura 21, mientras que, para los elementos tipo Z, se emplea el modelo de la figura 22.

**Tabla 36.** Comparación de interacción de fuerzas entre las hojas de cálculo y el programa

Elemento	Hoja de cálculo	SAP 2000	%Diferencia
100 x 100 x 2,37 mm	0,813	0,811	0,25%
72 x 72 x 2,37 mm	0,805	0,805	0,00%
C 150 x 50 x 15 x 3.17 mm	0,928	0,928	0,00%
Z 200 x 50 x 15 x 2.37 mm	0,997	0,998	0,10%

## 3.2 Análisis de resultados

La comparación de resultados, como se puede observar en el apartado anterior, permite verificar la veracidad de las propiedades geométricas, tanto de los elementos tubulares como de elementos tipo C y Z. En el caso de los elementos tubulares, se observa un porcentaje de error del 0,09%, mientras que para los elementos tipo C y Z, se registran porcentajes de error del 0,20% y 0,36%, respectivamente. Es importante destacar que en el caso de los elementos tipo C y Z, estas variaciones pueden atribuirse, en parte, a que los resultados del Manual AISI (2013) están expresados en unidades de medidas imperiales o sistema inglés. Al hacer la conversión, se podría generar diferencias con los resultados obtenidos en la hoja de cálculo. Además, cabe destacar que parte de este error puede derivarse del redondeo de los resultados, el cual, al estar acompañado de un cambio de unidad de medida, podría influir, significativamente, en los resultados. No obstante, es relevante destacar que los datos muestran una variación que se encuentra por debajo del 1%, lo que indica una precisión notable.

Al analizar los resultados obtenidos en la sección de cálculos de diseño, se observa una variación en el cálculo de la resistencia de diseño en flexión de un elemento tubular, correspondiente al ejemplo II-9 del Manual de AISI (2013). Es importante destacar que los resultados del ejemplo se obtienen utilizando el método **Ancho Efectivo**, mientras que las hojas de cálculo están programadas con el método de **Resistencia Directa**. La elección de utilizar los resultados de este ejemplo para la comparación se basa en la falta de bibliografía que proporcione ejemplos o resultados de cálculos, mediante el método **Resistencia Directa**. Es relevante mencionar que, en los comentarios de la especificación S100 (AISI 2016a), se menciona que esta no posee preferencia entre los dos métodos de diseño y, además, ambos proporcionan niveles consistentes de confianza, aunque no brindan resultados, numéricamente, idénticos.

Dado que se obtiene un porcentaje de error del 12,25% al comparar los resultados del ejemplo II-9 del Manual de AISI (2013) y con la finalidad de verificar la precisión de la hoja de cálculo, se procede a realizar los cálculos de forma manual, tal y como se adjunta el apéndice 3. Al comparar los resultados obtenidos de forma manual usando el enunciado del ejemplo II-9 del Manual de AISI, pero resolviendo el ejercicio mediante el método de **Resistencia Directa** se obtiene un porcentaje de error del 0,00%. Este porcentaje de diferencia entre los cálculos demuestra que el uso de tres decimales es suficiente para obtener resultados precisos, así como también que existe congruencia entre los cálculos obtenidos por medio de la hoja de cálculo y los cálculos obtenidos de forma manual. En cuanto a los parámetros restantes de comparación en los elementos tubulares, se observa que la máxima diferencia entre los resultados corresponde a un 0,09% lo cual no representa un porcentaje de error significativo. Se destaca la precisión al realizar la comparación con los resultados obtenidos, mediante el uso del software de diseño y análisis estructural, SAP 2000, en donde a pesar de que en algunos casos se utiliza el método de diseño **Ancho Efectivo**, los cálculos muestran un porcentaje de error prácticamente nulo (0,03%).

En cuanto a los resultados de diseño de los elementos tipo C, se observa que el mayor porcentaje de error se presenta en el cálculo de resistencia nominal a la flexión considerando la interacción del pandeo local y el pandeo global alrededor del eje Y, como se muestra en la tabla 24. Este porcentaje de error corresponde al 0,54%. Es importante destacar que la comparación de este resultado se lleva a cabo, a partir del ejemplo I de la del informe de investigación D100 del AISI (2021), en el cual los datos se obtienen bajo el **Método Directo** y se expresan en unidades imperiales. Este último factor, junto con el uso de dos cifras significativas y, por ende, el redondeo de los resultados puede generar variaciones que se reflejen dentro del valor correspondiente al 0,54%.

Adicionalmente, se destaca un porcentaje de error máximo del 0,02% al comparar los resultados obtenidos por medio de la hoja de cálculo con los del software de diseño y análisis estructural, en cuanto a la

capacidad del elemento 150 x 50 x 15 x 3,17 m. Es importante mencionar que estas capacidades se obtuvieron, mediante una longitud libre del elemento de 300 cm y un factor de longitud efectiva (K) correspondiente a 1. Este porcentaje muestra una mínima variación entre los resultados obtenidos por medio del software y los resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo para elementos tipo C. Cabe mencionar que algunos de los resultados brindados por el software se obtienen por medio del método **Ancho Efectivo**.

En relación con los elementos de tipo Z, se destaca que la variación máxima en los porcentajes de diferencia alcanza un 0,39%. Esta diferencia se obtiene al calcular la resistencia de diseño en compresión, considerando el pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje X. De manera similar, en el caso de los elementos tipo C, al usar la misma especificación para obtener los parámetros de comparación, se hace referencia a los factores mencionados anteriormente, lo cuales pueden influir en el porcentaje de error. Además, se observan porcentajes de error menores al 1% en la comparación de resultados de la hoja de cálculo con los resultados obtenidos por medio del software SAP 2000. Es importante mencionar que, aunque algunos de los resultados proporcionados por el programa se obtienen por medio del método **Ancho Efectivo**, se observa una buena precisión entre los resultados.

Al evaluar los datos proporcionados por las hojas de cálculo, se observa que todos los resultados se encuentran por debajo de un valor de 1. Esto demuestra que el diseño propuesto es válido para resistir no solo fuerzas y/o cargas unitarias, sino que también la combinación de estas. Es relevante mencionar que, en la interacción 8, el valor podría llegar a ser de un valor de hasta 1.197, según se define en las ecuaciones 243 y 244. Mediante el uso de las figuras 21 y 22, se observa el máximo valor de las ecuaciones de fuerzas combinadas proporcionadas por el programa de diseño y análisis estructural (SAP 2000 Ultimate), los detalles de estos resultados se adjuntan en el apartado de anexos.

Respecto de la comparación entre los resultados de las interacciones máximas proporcionadas por el software y las interacciones más críticas obtenidas, a través de las hojas de cálculo, se observa que los porcentajes de error que no superan el 0,25%. Esto corrobora la precisión de las hojas de cálculo en la evaluación de los elementos por demanda y capacidad cuando se encuentran sometidos a múltiples fuerzas simultáneas, lo cual resulta ser muy probable durante un sismo y por lo cual es vital evaluar las interacciones o combinaciones de fuerzas. Los porcentajes de variación obtenidos en esta comparación pueden deberse a varios factores, unos de estos corresponden al uso del método **Ancho Efectivo** por parte del programa de diseño y análisis estructural para la obtención de algunos parámetros de diseño, así como también se destaca que el software mantiene una mayor precisión en cuanto a los valores respectivos de los esfuerzos, a los cuales se somete cada elemento, individualmente.

# Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones

Se implementó un procedimiento de cálculo estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío de tipo tubular, C y Z. Este procedimiento sigue los parámetros de diseño establecidos en la especificación S100-2016 del Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI), y cumple con los criterios del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010/16). En este procedimiento, se emplean tanto el método de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) como el método de **Resistencia Directa**, para el diseño de los diferentes perfiles.

Por medio de pruebas comparativas con artículos científicos, cálculos realizados de forma manual, fichas técnicas, y resultados de software especializado, se determinó que el procedimiento de diseño estandarizado de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares, proporciona resultados precisos y confiables.

Como parte integral del proyecto, se creó una guía de uso de la herramienta de diseño, con el propósito de facilitar la utilización del procedimiento de cálculo estandarizado. Esta guía se apoya en este trabajo escrito para detallar el funcionamiento del procedimiento estandarizado de diseño de perfiles laminados en frío.

## Recomendaciones

Se sugiere la implementación de un procedimiento estandarizado complementario para el diseño de conexiones de perfiles laminados en frío. Esto es, particularmente, relevante, ya que en algunas ocasiones, el diseño de elementos de acero se basa en la capacidad de las conexiones para resistir las fuerzas a la cual se someten las uniones entre los elementos.

Al diseñar estructuras con perfiles laminados en frío, se recomienda siempre hacer uso del procedimiento estandarizado desarrollado en este trabajo. Esto permitirá validar los datos proporcionados por el software en caso de realizar el modelo de la estructura en un programa de diseño y análisis estructural capaz de evaluar elementos laminados en frío. De esta manera, se puede comprobar y asegurar que el diseño es preciso y correcto.

Se sugiere llevar a cabo una evaluación más exhaustiva para determinar el aumento realizable en la capacidad de los esfuerzos por fluencia mediante el laminado en frío. Esto es relevante, ya que como se puede observar en el marco metodológico, este proyecto utiliza, únicamente el esfuerzo de fluencia del acero virgen, el cual se especifica en las fichas técnicas proporcionadas por los proveedores.

Se recomienda siempre comprobar el cumplimiento de los estados límites de servicio durante el proceso de diseño, de acuerdo con los códigos vigentes, para garantizar que las estructuras sean confortables para los usuarios y cumplan con los estándares aplicables.

# Referencias

- American Iron and Steel Institute. (2016a). Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI S100).
- American Iron and Steel Institute. (2016b). North American specification for the design of cold-formed (AISI S100).
- American Iron and Steel Institute. (2013). Cold-Formed Steel Design Manual (AISI Manual).
- American Iron and Steel Institute. (2021). Development of Design Tables for the Cold-Formed Steel Cross-Sections in AISI D100.
- Caamaño Palau, E. (2009). Estudio teórico y experimental de los modos de pandeo de perfiles estructurales de acero de chapa delgada, conformados en frío, de sección abierta y con perforaciones sometidos a compresión. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/7695>
- Computers and Structures, I. SAP 2000 Ultimate [computer software]
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2016). Código Sísmico de Costa Rica 2010. Revisión 2014 (5ta ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Hibbeler, R. C. (2017). Mechanics of materials. (10ma ed.).
- Instituto Canadiense de Construcción en Acero. (2002). TORSIONAL SECTION PROPERTIES OF STEEL SHAPES. (CISC).
- Kabir, I., & Bhowmick, A. K. (2016). Lateral Torsional Buckling of Welded Wide Flange Beams. Orlando, Florida.
- Metalco, S. A. (s.f). TUBERÍA ESTRUCTURAL. [https://metalco.net/wpcontent/uploads/2022/12/FT\\_Tuberia-Estructural\\_61222.pdf](https://metalco.net/wpcontent/uploads/2022/12/FT_Tuberia-Estructural_61222.pdf)
- Monge, D., & Vindas, R. (2002). Manual de Construcción para Estructuras Metálicas con base en Perfiles Doblados en Frío [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/252>
- Oviedo, A. (2010). 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. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/6241>
- Romanjek, M. (2011). PROPIEDADES Y CAPACIDADES DE LOS PERFILES TIPO “Z” LAMINADOS EN FRÍO Y PRODUCIDOS EN COSTA RICA. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/611>

Romanjek, M. (2013a). PROPIEDADES Y CAPACIDADES DE LOS TUBOS ESTRUCTURALES LAMINADOS EN FRÍO Y PRODUCIDOS EN COSTA RICA.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/7903>

Romanjek, M. (2013b). Tablas y propiedades de perfiles laminados en frío pertenecientes a la fábrica nacional Metalco. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/8004>

Wei-Wen Yu, LaBoube, R., & Chen, H. (2020). Cold-Formed Steel Design. (5ta ed). John Wiley.

# Apéndices

**Apéndice 1. Guía de uso del procedimiento estandarizado.**



**Guía de uso del procedimiento estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares.**

## Índice

Introducción .....	3
Estructura de la herramienta de cálculo .....	3
- Entrada y Salida de Datos .....	4
- Hoja de Cálculo.....	6
- Resistencias Requeridas .....	6
- Perfiles.....	6
Funcionalidades especiales .....	8
- Menú de perfiles .....	8
- Filtros.....	8

# Introducción

Esta guía tiene como objetivo proporcionar instrucciones detalladas y claras para la utilización del procedimiento de cálculo estandarizado para el diseño de perfiles laminados en frío tipo C, Z y tubulares. Esta guía está dirigida a ingenieros y profesionales responsables del diseño de estructuras que incorporan estos perfiles. Al seguir la guía paso tras paso, los profesionales podrán diseñar elementos de manera estandarizada, para reducir los posibles riesgos de error y mejorar la eficiencia. Además, esta guía permite a los ingenieros estructurales trabajar de una manera más eficiente cuando se requiera de un trabajo colaborativo.

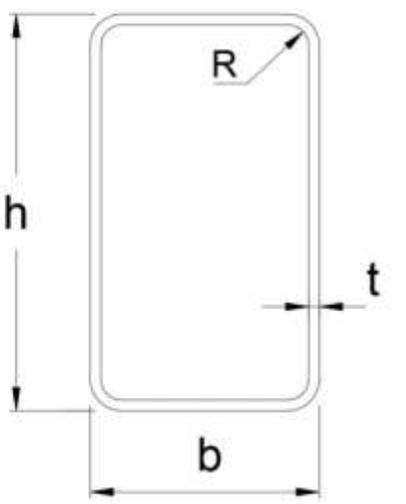
## Estructura de la herramienta de cálculo

Los tres procedimientos de diseño constan de cuatro hojas de cálculo (Entrada y Salida de Datos, Hoja de Cálculo, Resistencias Requeridas y Perfiles), tal y como se observa en la figura 1.

Diseño de secciones tubulares laminadas en frío según el AISI 5100-16	
Propiedades del material	Comentarios
$E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$	Módulo de elasticidad del acero
$G = 807692,31 \text{ kg/cm}^2$	Módulo de corte de acero
$\mu = 0,3$	Relación de Poisson del acero
$F_{yv} = 2314 \text{ kg/cm}^2$	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero virgen
$F_{uv} = 3160 \text{ kg/cm}^2$	Resistencia a la tracción del acero virgen

Propiedades del elemento	Comentarios
--------------------------	-------------

Sección 72X72X2,37

Entrada y Salida de Datos | Hoja de Cálculo | Resistencias Requeridas | Perfiles

Figura 1. Hojas de Cálculo de los procedimientos de diseño.

A continuación, se describe cada una de las hojas de cálculo:

- **Entrada y Salida de Datos:** Como su nombre indica, en este apartado se ingresan las propiedades del material y del elemento propuesto para el diseño. Esto se realiza en las primeras filas de la hoja de cálculo, tal y como se muestra en la figura 2 y 3. Además, en este apartado se presentan todos los resultados que se obtienen, mediante la herramienta, se incluyen los resultados de la interacción de fuerzas y un apartado con los resultados en unidades de toneladas y metros, para proporcionar una mayor comodidad en algunos casos, en donde sea necesario de trabajar con grandes magnitudes. Los apartados anteriores se visualizan en las figuras 4, 5 y 6.

Diseño de secciones rectangulares laminadas en frío según el AISI S100-16			
Propiedades del material		Comentarios	
E =	2100000 kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del acero	
G =	807692,31 kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de corte de acero	
μ =	0,3	Relación de Poisson del acero	
F <sub>yV</sub> =	2314 kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero virgen	
F <sub>UV</sub> =	3160 kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción del acero virgen	

Figura 2. Ingreso de las propiedades del material.

Propiedades del elemento		Comentarios	
Sección 72X72X2,37			
h =	7,20 cm	Esbeltez del elemento	
b =	7,20 cm	Ancho del elemento	
t =	0,237 cm	Espesor de la sección	
R =	0,474 cm	Radio interno de doblez	
K <sub>ax</sub> =	1,00	Factor de longitud efectiva en el eje x	
K <sub>ay</sub> =	1,00	Factor de longitud efectiva en el eje y	
K <sub>t</sub> =	1,00	Factor de longitud efectiva para torsión	
L <sub>ax</sub> =	76 cm	Longitud no amostrada del elemento en el eje x	
L <sub>ay</sub> =	38 cm	Longitud no amostrada del elemento en el eje y	
L <sub>t</sub> =	76 cm	Longitud no amostrada del elemento para torsión	
k <sub>ca</sub> =	4	Coeficiente de pandeo de la placa en compresión	
k <sub>cb</sub> =	23,9	Coeficiente de pandeo de la placa en flexión	
k <sub>cs</sub> =	5,34	Coeficiente de pandeo de la placa en cortante	
C =	10	Coeficiente de la tabla G5-5	
C <sub>rv</sub> =	0,11	Coeficiente de longitud del rodamiento de la tabla G5-5	
N =	12,00 cm	Longitud de apoyo de la carga (mínimo 19 mm)	
C <sub>rv</sub> =	0,14	Coeficiente de longitud de apoyo de la tabla G5-5	
C <sub>1</sub> =	0,04	Coeficiente de esbeltez del alma de la tabla G5-5	

Figura 3. Ingreso de las propiedades del elemento.

Capacidad del elemento		Comentarios
$\phi_t T_n =$	12107,05 kg	Resistencia de diseño en tensión
$\phi_c P_{n,x} =$	11233,604 kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje X
$\phi_c P_{n,x} =$	11233,604 kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X
$\phi_c P_{n,y} =$	6811,198 kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y
$\phi_c P_{n,y} =$	6811,198 kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y
$\phi_b M_{n,x} =$	43505,54 kg-cm	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje X
$\phi_b M_{n,y} =$	23710,24 kg-cm	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje Y
$\phi_v V_{n,x} =$	1622,35 kg	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje X
$\phi_v V_{n,y} =$	5579,29 kg	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje Y
$\phi_w P_{nw} =$	2155,90 kg	Resistencia de diseño al aplastamiento del alma
$M_{alo,x} =$	48339,49 kg-cm	Resistencia disponible del elemento flexionado en el eje X
$M_{alo,y} =$	26344,72 kg-cm	Resistencia disponible del elemento flexionado en el eje Y
$M_{nlo,x} =$	43505,54 kg-cm	Resistencia nominal del elemento flexionado en el eje X
$M_{nlo,y} =$	23710,24 kg-cm	Resistencia nominal del elemento flexionado en el eje Y
$M_{nxt} =$	43505,54 kg-cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión
$M_{nyt} =$	23710,24 kg-cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión

Figura 4. Capacidad del elemento propuesto.

Interacción de fuerzas (D/C)		
Interacción 1	0,47543	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-1)
Interacción 2	0,45807	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-2)
Interacción 3	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 4	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 5	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 6	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 7	0,47316	Flexión y cortante combinadas. (Eq. H2-1)
Interacción 8	0,72823	Combinación de flexión y aplastamiento del alma (Eq. H3-1b)

Figura 5. Resultados de la interacción de fuerzas

Datos en toneladas (T) y metros (m)				
Capacidad		Demanda		Comentarios
$\phi_t T_n =$	13,245	1,2666		
$\phi_c P_{n,x} =$	11,948	5,4152		Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje X
$\phi_c P_{n,x} =$	11,948	5,4152		Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X
$\phi_c P_{n,y} =$	12,381	5,4152		Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y
$\phi_c P_{n,y} =$	12,381	5,4152		Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y
$\phi_b M_{n,x} =$	29,082	0,135		Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje X
$\phi_b M_{n,y} =$	29,082	0,042		Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje Y
$\phi_v V_{n,x} =$	3,612	0,028		Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje X
$\phi_v V_{n,y} =$	3,612	0,916		Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje Y

Figura 6. Resultados de capacidad y demanda en toneladas y toneladas-m.

- **Hoja de Cálculo:** Este apartado proporciona un cálculo detallado de todos los parámetros necesarios para el diseño de los perfiles laminados en frío. Se destaca que se ha establecido un formato específico para que, en caso de ser necesario, proporcionar una memoria de cálculo, sea suficiente con imprimir los datos contenidos en esta hoja.
- **Resistencias Requeridas:** En esta hoja se ingresan los datos de las fuerzas a las que se someten los diferentes elementos de la estructura por diseñar. Estos datos deben ser agregados en la sección **TABLA EDITABLE**, se deben respetar los encabezados de la tabla que se muestran con tonalidades diferentes, tal como se observa en la figura 7. Además, estos datos deben ser agregados en toneladas y toneladas·metro, tal y como se especifica en el encabezado de la tabla. El usuario debe asegurarse de que el rango de los parámetros de interacción, que se encuentran, tanto a la derecha de la tabla editable como en la parte superior, incluyan la totalidad de los datos ingresados. Esta hoja está programada para considerar datos hasta la fila número 50000, por lo tanto, siempre se debe verificar que todos los datos sean evaluados.

TABLA EDITABLE												
TABLE: Element Forces - Frames												
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2 = Vuy	V3 = Vux	T	M2 = Muy	M3 = Mux	FrameElem	ElemStation	
Text	m	Text	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	Text	m	
336	0	6-2	Combination	-5,1366	-0,6829	0,00006973	0,00012	0,00064	-0,10851	336-1	0	
209	3,80789	6-2	Combination	-5,1364	0,6829	-0,00006919	-0,00012	0,00064	-0,10851	209-9	0,15232	
219	3,80789	6-2	Combination	-5,1361	0,6829	0,00007116	0,00012	-0,00064	-0,10851	219-9	0,15232	
340	0	6-2	Combination	-5,1361	-0,6829	-0,0000679	-0,00012	-0,00064	-0,10851	340-1	0	
336	1,52315	6-2	Combination	-5,3916	0,2506	-0,00001295	0,0000918	0,00058	0,09061	336-5	0	
209	2,28473	6-2	Combination	-5,3914	-0,2506	0,00001366	-0,00009194	0,00058	0,09061	209-5	0,53516	
219	2,28473	6-2	Combination	-5,3911	-0,2506	-0,00001131	0,00009162	-0,00058	0,09061	219-5	0,53516	
340	1,52315	6-2	Combination	-5,3911	0,2506	0,00001537	-0,00009231	-0,00058	0,09061	340-5	0	
336	1,52315	6-2	Combination	-5,2538	-0,3159	-0,00001295	0,0000918	0,00058	0,09061	336-4	0,494	
209	2,28473	6-2	Combination	-5,2536	0,3159	0,00001366	-0,00009194	0,00058	0,09061	209-6	0	
219	2,28473	6-2	Combination	-5,2533	0,3159	-0,00001131	0,00009162	-0,00058	0,09061	219-6	0	

Figura 7. Sección de ingreso de demandas.

- **Perfiles:** Esta hoja proporciona una base de datos con parámetros básicos de los perfiles laminados en frío, que incluyen la esbeltez (h), el ancho (b), el espesor (t) y el radio interno de doblez (R). Además, en el caso de elementos tipo C, se incluye la longitud de la pestaña (d), y en elementos tipo Z, se añade el parámetro de longitud de pestaña (d), así como también el ángulo de pestaña (Y).

Perfil	t (mm)	R (mm)	h (mm)	b (mm)
12x12x0,70	0,70	1,40	12	12
12x12x0,80	0,80	1,60	12	12
12x12x0,90	0,90	1,80	12	12
12x12x0,95	0,95	1,90	12	12
12x12x1,20	1,20	2,40	12	12
19x19x0,70	0,70	1,40	19	19
19x19x0,80	0,80	1,60	19	19
19x19x0,95	0,95	1,90	19	19
19x19x1,00	1,00	2,00	19	19
19x19x1,20	1,20	2,40	19	19
19x19x1,50	1,50	3,00	19	19
22x22x0,95	0,95	1,90	22	22
22x22x1,20	1,20	2,40	22	22
22x22x1,50	1,50	3,00	22	22
25x25x0,70	0,70	1,40	25	25
25x25x0,80	0,80	1,60	25	25
25x25x0,90	0,90	1,80	25	25
25x25x1,00	1,00	2,00	25	25
25x25x1,20	1,20	2,40	25	25
25x25x1,80	1,80	3,60	25	25
31x31x0,80	0,80	1,60	31	31
31x31x0,90	0,90	1,80	31	31
31x31x0,95	0,95	1,90	31	31
31x31x1,20	1,20	2,40	31	31
31x31x1,50	1,50	3,00	31	31

Figura 8. Base de datos de perfiles tubulares.

# Funcionalidades especiales

Con el objetivo de ofrecer más facilidades en el procedimiento estándar de diseño, se incorporan dos funciones especiales que se describen a continuación:

- **Menú de perfiles:** En la hoja de **Entrada y Salida de Datos**, se encuentra un menú despegable diseñado para facilitar el ingreso de las propiedades básicas de diferentes perfiles. A este menú se puede acceder posicionándose en la casilla que se muestra en la figura 9. Al hacerlo, se activará un botón a la derecha que permite acceder a la base de datos que se encuentra en la hoja de cálculo **Perfiles**. En caso de no encontrar la sección requerida dentro del menú, se puede ingresar los datos de manera directa en las casillas correspondientes o agregar los parámetros básicos de la sección en la base de datos, asegurándose de que los datos se encuentren entre la fila 4 y la fila 200, y se respeta el encabezado de la base de datos.

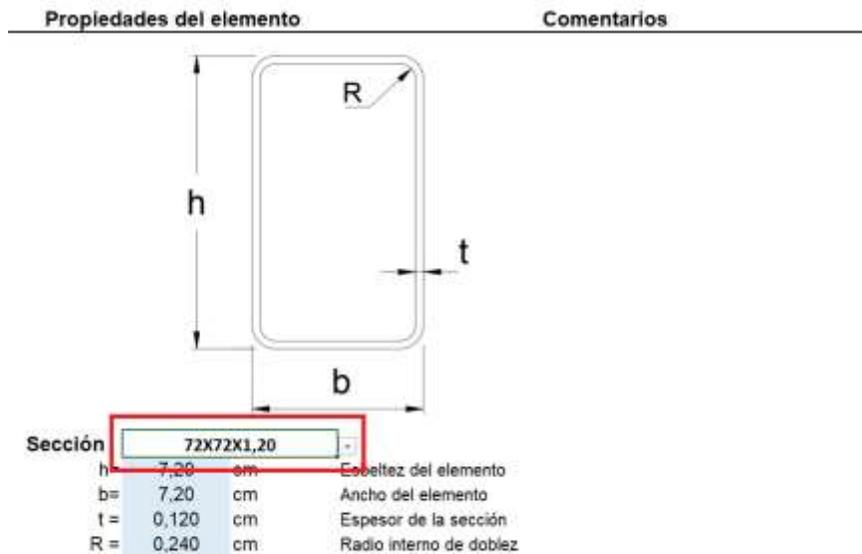


Figura 9. Casilla de ingreso al menú de perfiles.

- **Filtros:** En la hoja de cálculo **Resistencias Requeridas**, se establecen filtros en los encabezados de las tablas esta hoja. Estos filtros resulta que tienen una gran utilidad cuando se necesita realizar diferentes visualizaciones, como ordenar los datos de una columna de mayor a menor, para identificar los casos de carga más críticos. En la figura 10 se muestra el acceso a estos filtros, mediante un ícono cuadrado con un triángulo invertido en su interior.

TABLA EDITABLE																	
TABLE: Element Forces - Frames																	
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	VZ = Vzy	VX = Vyx	T	MZ = Muy	MX = Mux	FrameElem	Elementation	Interacción	Combinación de flexión y cortante. [Eq. H2-1]				
Text	m	Text	Text	Text	Text	Text	Text	Text	Text	Text	m	M1/M2	M <sub>uz</sub> /M <sub>ux</sub>	M <sub>yz</sub> /M <sub>xy</sub>	V <sub>uz</sub> /Q <sub>ux</sub>	V <sub>yz</sub> /Q <sub>xy</sub>	
336	0 6-2		Combination	-5,1166	-0,6829	0,00006973	0,00012	0,00064	-0,10851	336-1		0	0,005886074	0,33580339	0,001980594	1,9303E-05	0,189044055
205	3,80789 6-2		Combination	-5,1364	0,6829	-0,00006915	-0,00012	0,00064	-0,10851	205-9		0,15232	0,005886074	0,33580339	0,001980594	1,91535E-05	0,189044055
219	3,80789 6-2		Combination	-5,1361	0,6829	0,00007116	0,00012	-0,00064	-0,10851	219-8		0,15232	0,005886074	0,33580339	0,001980594	1,90989E-05	0,189044055
340	0 6-2		Combination	-5,1361	-0,6829	-0,00006979	-0,00012	-0,00064	-0,10851	340-1		0	0,005886074	0,33580339	0,001980594	1,87964E-05	0,189044055
336	1,32515 6-2		Combination	-5,3916	0,2506	-0,00001295	0,0000918	0,00058	0,09091	336-5		0	0,006401059	0,280408941	0,001794914	3,58489E-06	0,069372441
205	2,28473 6-2		Combination	-5,3914	-0,2506	0,00001366	-0,00009194	0,00058	0,09081	205-5		0,53516	0,006401059	0,280408941	0,001794914	3,78143E-06	0,069372441

Figura 10. Botón de filtros en la hoja "Resistencias Requeridas".

# Apéndice 2. Herramienta de cálculo.

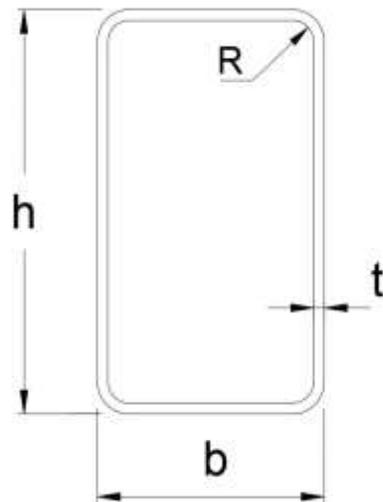
## Hoja: Entrada y Salida de Datos

### Diseño de secciones rectangulares laminadas en frío, según el AISI S100-16

Propiedades del material			Comentarios
E =	2100000	kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del acero
G =	807692,31	kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de corte de acero
μ =	0,3		Relación de Poisson del acero
F <sub>yv</sub> =	2314	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero virgen
F <sub>uv</sub> =	3160	kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la tracción del acero virgen

Propiedades del elemento			Comentarios
--------------------------	--	--	-------------



#### Sección 72X72X2,37

h =	7,20	cm	Esbeltez del elemento
b =	7,20	cm	Ancho del elemento
t =	0,237	cm	Espesor de la sección
R =	0,474	cm	Radio interno de doblez
K <sub>x</sub> =	1,00		Factor de longitud efectiva en el eje x
K <sub>y</sub> =	1,00		Factor de longitud efectiva en el eje y
K <sub>t</sub> =	1,00		Factor de longitud efectiva para torsión
L <sub>x</sub> =	76	cm	Longitud no arriostrada del elemento en el eje x
L <sub>y</sub> =	36	cm	Longitud no arriostrada del elemento en el eje y
L <sub>t</sub> =	76	cm	Longitud no arriostrada del elemento para torsión

$k_c =$	4	Coefficiente de pandeo de la placa en compresión
$k_f =$	23,9	Coefficiente de pandeo de la placa en flexión
$k_v =$	5,34	Coefficiente de pandeo de la placa en cortante
$C =$	10	Coefficiente de la tabla G5-5
$C_R =$	0,11	Coefficiente de longitud del rodamiento de la tabla G5-5
$N =$	12,00	cm Longitud de apoyo de la carga (mínimo 19 mm)
$C_N =$	0,14	Coefficiente de longitud de apoyo de la tabla G5-5
$C_h =$	0,04	Coefficiente de esbeltez del alma de la tabla G5-5

Capacidad del elemento			Comentarios
$\phi_t T_n =$	13245,01	kg	Resistencia de diseño en tensión
$\phi_c P_{n,x} =$	11947,554	kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje X
$\phi_c P_{n,x} =$	11947,554	kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X
$\phi_c P_{n,y} =$	12381,296	kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y
$\phi_c P_{n,y} =$	12381,296	kg	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y
$\phi_b M_{n,x} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje X
$\phi_b M_{n,y} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje Y
$\phi_v V_{n,x} =$	3612,39	kg	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje X
$\phi_v V_{n,y} =$	3612,39	kg	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje Y
$\phi_w P_{nw} =$	5767,36	kg	Resistencia de diseño al aplastamiento del alma
$M_{alo,x} =$	32313,53	kg-cm	Resistencia disponible del elemento flexionado en el eje X
$M_{alo,y} =$	32313,53	kg-cm	Resistencia disponible del elemento flexionado en el eje Y
$M_{nlo,x} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia nominal del elemento flexionado en el eje X
$M_{nlo,y} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia nominal del elemento flexionado en el eje Y
$M_{axt} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión
$M_{ayt} =$	29082,18	kg-cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión

### Interacción de fuerzas (D/C)

Interacción 1	0,47543	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-1)
Interacción 2	0,45807	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-2)
Interacción 3	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 4	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 5	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 6	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
Interacción 7	0,47316	Flexión y cortante combinadas. (Eq. H2-1)
Interacción 8	0,72823	Combinación de flexión y aplastamiento del alma (Eq. H3-1b)

**Datos en toneladas (T) y metros (m)**

---

	<b>Capacidad</b>	<b>Demanda</b>	<b>Comentarios</b>
$\phi_t T_n =$	<b>13,245</b>	<b>1,2666</b>	Resistencia de diseño en tensión
$\phi_c P_{n,x} =$	<b>11,948</b>	<b>5,4152</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje X
$\phi_c P_{n,x} =$	<b>11,948</b>	<b>5,4152</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X
$\phi_c P_{n,y} =$	<b>12,381</b>	<b>5,4152</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y
$\phi_c P_{n,y} =$	<b>12,381</b>	<b>5,4152</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y
$\phi_b M_{n,x} =$	<b>29,082</b>	<b>0,135</b>	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje X
$\phi_b M_{n,y} =$	<b>29,082</b>	<b>0,042</b>	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje Y
$\phi_v V_{n,x} =$	<b>3,612</b>	<b>0,028</b>	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje X
$\phi_v V_{n,y} =$	<b>3,612</b>	<b>0,916</b>	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje Y

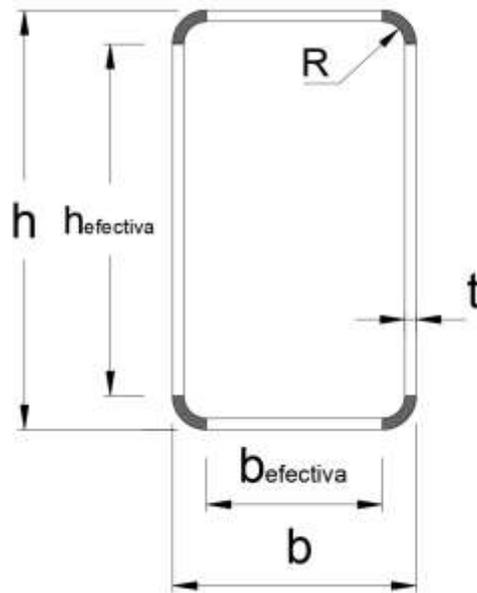
# Hoja: Hoja de Cálculo

	PROYECTO:	Realizado por: Ing.
		Revisado por: Ing.
<b>Diseño de secciones tubulares laminadas en frío según el AISI S100-16</b>		

Propiedades del material	Comentarios
$E = 2100000 \text{ kg/cm}^2$	Módulo de elasticidad del acero
$G = 807692,31 \text{ kg/cm}^2$	Módulo de corte de acero
$\mu = 0,3$	Relación de Poisson del acero
$F_{yv} = 2314 \text{ kg/cm}^2$	Esfuerzo de fluencia por tracción del acero virgen
$F_{uv} = 3160 \text{ kg/cm}^2$	Resistencia a la tracción del acero virgen

Propiedades del elemento	Comentarios
--------------------------	-------------



$h = 7,20 \text{ cm}$	Esbeltez del elemento
$b = 7,20 \text{ cm}$	Ancho del elemento
$t = 0,24 \text{ cm}$	Espesor de la sección

R =	0,47	cm	Radio interno de doblez
$h_{\text{efectiva}}$ =	5,78	cm	Esbellez efectiva
$b_{\text{efectiva}}$ =	5,78	cm	Ancho efectivo
r =	0,59	cm	Radio medio de doblez
u =	0,93	cm	Longitud media de doblez
$A_g$ =	6,3598	cm <sup>2</sup>	Área completa de la sección transversal
$A_n$ =	6,36	cm <sup>2</sup>	Área neta de la sección transversal
$K_x$ =	1,00		Factor de longitud efectiva en el eje x
$K_y$ =	1,00		Factor de longitud efectiva en el eje y
$K_t$ =	1,00		Factor de longitud efectiva para torsión
$L_x$ =	76,16	cm	Longitud del elemento en el eje x
$L_y$ =	36,02	cm	Longitud del elemento en el eje y
$L_t$ =	76,16	cm	Longitud no arriostrada del elemento para torsión
$I_{xx}$ =	50,2717	cm <sup>4</sup>	Inercia del elemento sobre el eje x
$I_{yy}$ =	50,27	cm <sup>4</sup>	Inercia del elemento sobre el eje y
$S_x$ =	13,96	cm <sup>3</sup>	Módulo de sección con respecto al eje x
$S_y$ =	13,96	cm <sup>3</sup>	Módulo de sección con respecto al eje y
$r_x$ =	2,81	cm	Radio de giro en el eje x
$r_y$ =	2,81	cm	Radio de giro en el eje y
$C_b$ =	1,00		*Se permite estimar $C_b=1$ , de manera conservadora para todos los casos.
J =	82,01	cm <sup>4</sup>	Constante de torsión de la sección
$C_w$ =	0,00	cm <sup>6</sup>	Constante de alabeo torsional de la sección transversal

## D. MIEMBROS EN TENSIÓN

---

### D2 Fluencia de la sección bruta

			Comentarios
$\phi_t$ =	0,90		Factor de resistencia
$T_n$ =	14717	kg	Resistencia nominal a tracción. (Eq. D2-1)
$\phi_t T_n$ =	13245	kg	Resistencia de diseño por fluencia

### D3 Ruptura de Sección Neta

$\phi_t$ =	0,75		Factor de resistencia
$T_n$ =	20097	kg	Resistencia nominal a tracción. (Eq. D3-1)
$\phi_t T_n$ =	15073	kg	Resistencia de diseño por ruptura

## E. MIEMBROS EN COMPRESIÓN

### E2 Fluencia y pandeo global (flexión, flexión-torsional y torsional)

### Comentarios

$$\varphi_c = 0,85 \quad \text{Factor de resistencia}$$

### Alrededor del eje X (eje fuerte)

#### E2.1 Secciones no sujetas a pandeo torsional o flexo-torsional

Para secciones de simetría doble, secciones cerradas o cualquier otra sección para la cual se puede demostrar que no está sujeta a pandeo torsional o flexo-torsional.

$F_{cre} =$	21084,19	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo crítico de pandeo elástico por flexión <b>alrededor del eje de pandeo.</b> (Eq.E2.1-1)
$\lambda_c =$	0,33		(Eq. E2-4)
$F_n =$	2210	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de compresión. (Eq. E2-2)-(Eq. E2-3)
$P_{ne} =$	14056	kg	Resistencia nominal en compresión. (Eq. E2-1)
$\phi_c P_{ne} =$	<b>11948</b>	<b>kg</b>	<b>Resistencia de diseño en compresión para miembros <u>no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional</u> sobre el eje X</b>

$k_c =$	4		Coeficiente de pandeo de la placa
$w =$	5,78	cm	Ancho plano del elemento
$F_{crl} =$	12773	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de pandeo crítico mínimo. (Eq. 1.1-4)
$L_{0,x} =$	113,25	cm	Longitud en la que la tensión de pandeo local es igual a la tensión de pandeo por flexión, eje x. (Eq.E2.1.1-1)
$R_{r,x} =$	0,86		Factor de reducción, eje x. (Eq. E2.1.1-2)
$R_{r,x} \cdot r_x =$	2,43	cm	

#### E2.2 Secciones con doble o simple simetría sujetas a pandeo por torsión o por flexión-torsión

$\sigma_t =$	658828,77	kg/cm <sup>2</sup>	(Eq. E2.2-5)
$\sigma_{ex} =$	28246,53	kg/cm <sup>2</sup>	(Eq.E2.2-6)
$r_o =$	3,98	cm	Radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de corte. (Eq. E2.2-4)
$\beta =$	1,00		(Eq. E2.2-3)
$F_{cre} =$	28246,53	kg/cm <sup>2</sup>	(Eq. E2.2-1)
$\lambda_c =$	0,29		(Eq. E2-4)
$F_n =$	2236,0	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de compresión. (Eq. E2-2)-(Eq. E2-3)
$P_{ne} =$	14221	kg	Resistencia nominal en compresión. (Eq. E2-1)

$$\phi_c P_{ne} = 12088 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X**

**E2 Fluencia y pandeo global (flexión, flexión-torsional y torsional)**

**Comentarios**

$$\phi_c = 0,85$$

Factor de resistencia

**Alrededor del eje Y (eje débil)**

**E2.1 Secciones no sujetas a pandeo torsional o flexo-torsional**

Para secciones de simetría doble, secciones cerradas o cualquier otra sección para la cual se puede demostrar que no está sujeta a pandeo torsional o flexo-torsional

$$F_{cre} = 94254,16 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo crítico de pandeo elástico por flexión **alrededor del eje de pandeo.** (Eq.E2.1-1)

$$\lambda_c = 0,16$$

(Eq. E2-4)

$$F_n = 2290 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo de compresión. (Eq. E2-2)-(Eq. E2-3)

$$P_{ne} = 14566 \text{ kg}$$

Resistencia nominal en compresión. (Eq. E2-1)

$$\phi_c P_{ne} = 12381 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y**

**E2.1.1 Secciones de caja cerrada**

$$k_c = 4$$

Coefficiente de pandeo de la placa

$$w = 5,78 \text{ cm}$$

Ancho plano del elemento

$$F_{cr1} = 12773 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo de pandeo crítico mínimo. (Eq. 1.1-4)

$$L_{0,y} = 113,25 \text{ cm}$$

Longitud en la que la tensión de pandeo local es igual a la tensión de pandeo por flexión, eje x. (Eq.E2.1.1-1)

$$R_{r,y} = 0,86$$

Factor de reducción, eje y. (Eq. E2.1.1-2)

$$R_{r,y} \cdot r_y = 2,43 \text{ cm}$$

Radio de giro reducido

**E2.2 Secciones con doble o simple simetría sujetas a pandeo por torsión o por flexión-torsión**

$$\sigma_t = 658828,77 \text{ kg/cm}^2$$

(Eq. E2.2-5)

$$r_o = 3,98 \text{ cm}$$

Radio polar de giro de la sección transversal alrededor del centro de corte. (Eq. E2.2-4)

$$F_{cre} = 94254,16 \text{ kg/cm}^2$$

Según nota de la seccion E2.2

$$\lambda_c = 0,16$$

(Eq. E2-4)

$$F_n = 2290,3 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo de compresión. (Eq. E2-2)-(Eq. E2-3)

$$P_{ne} = 14566 \text{ kg}$$

Resistencia nominal en compresión. (Eq. E2-1)

$$\phi_c P_{ne} = 12381 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y**

**E3 pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global**

$$\varphi_C = 0,85$$

Factor de resistencia

**Alrededor del eje X**

**E3.2 Método de resistencia directa**

**E3.2.1 Miembros sin agujeros**

$$P_{ne} = 14056 \text{ kg}$$

Resistencia global de la columna. (Eq. E2-1)

$$P_{crit} = 81235 \text{ kg}$$

Fuerza de pandeo local. (Eq. 2.3.1.2-1)

$$\lambda_l = 0,42$$

(Eq. E3.2.1-3)

$$P_{nl} = 14056 \text{ kg}$$

(Eq. E3.2.1-1)-(Eq. E3.2.1-2)

$$\varphi_c P_{nl} = 11948 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje X, en miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional**

**E3.2.1 Miembros sin agujeros**

$$P_{ne} = 12088 \text{ kg}$$

Resistencia global de la columna. (Eq. E2-1)

$$P_{crit} = 81235 \text{ kg}$$

Fuerza de pandeo local. (Eq. 2.3.1.2-1)

$$\lambda_l = 0,39$$

(Eq. E3.2.1-3)

$$P_{nl} = 12088 \text{ kg}$$

(Eq. E3.2.1-1)-(Eq. E3.2.1-2)

$$\varphi_c P_{nl} = 10274 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje X, en miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión**

**E3 pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global**

$$\varphi_C = 0,85$$

Factor de resistencia

**Alrededor del eje Y**

**E3.2 Método de resistencia directa**

**E3.2.1 Miembros sin agujeros**

$$P_{ne} = 14566 \text{ kg}$$

Resistencia global de la columna. (Eq. E2-1)

$$P_{crit} = 81235 \text{ kg}$$

Fuerza de pandeo local. (Eq. 2.3.1.2-1)

$$\lambda_l = 0,42$$

(Eq. E3.2.1-3)

$$P_{nl} = 14566 \text{ kg}$$

(Eq. E3.2.1-1)-(Eq. E3.2.1-2)

$$\phi_c P_{nl} = 12381 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje Y, en miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional**

**E3.2.1 Miembros sin agujeros**

$$P_{ne} = 14566 \text{ kg}$$

Resistencia global de la columna. (Eq. E2-1)

$$P_{cr1} = 81235 \text{ kg}$$

Fuerza de pandeo local. (Eq. 2.3.1.2-1)

$$\lambda_l = 0,42$$

(Eq. E3.2.1-3)

$$P_{nl} = 14566 \text{ kg}$$

(Eq. E3.2.1-1)-(Eq. E3.2.1-2)

$$\phi_c P_{nl} = 12381 \text{ kg}$$

**Resistencia de diseño en compresión para pandeo local interactuando con la fluencia y el pandeo global sobre el eje Y, en miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión**

**F. MIEMBROS EN FLEXIÓN**

**F2 Cedencia y pandeo global (lateral-torsional)**

**Comentarios**

**Alrededor del eje X**

$$\phi_b = 0,90$$

Factor de resistencia

**F2.1 Inicio del límite elástico**

$$S_{fy} = 13,96 \text{ cm}^3$$

Módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en tensión

$$M_y = 32314 \text{ kg-cm}$$

(Eq. F2.1-2)

$$S_f = 13,96 \text{ cm}^3$$

Módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión

$$M_{ne} = 32314 \text{ kg-cm}$$

Resistencia nominal a la flexión para la fluencia y el pandeo global. (Eq. F2.1-1)

$$\phi_b M_{ne,x} = 29082 \text{ kg-cm}$$

**Resistencia de diseño en flexión para fluencia y pandeo global**

**F2.1.4 Secciones de caja cerrada**

$$L_u = 2926,86 \text{ cm}$$

(Eq. F2.1.4-1)

$$F_{cre} = 522299,48 \text{ kg/cm}^2$$

Esfuerzo de pandeo elástico para flexión (Eq. F2.1.4-2)

$$F_n = 2314 \text{ kg/cm}^2$$

(Eq. F2.1-3)-(Eq. F2.1-4)-(Eq. F2.1-5)

**F2 Cedencia y pandeo global (lateral-torsional)**

**Comentarios**

**Alrededor del eje Y**

$$\phi_b = 0,90$$

Factor de resistencia

**F2.1 Inicio del límite elástico**

$S_{fy} =$	13,96	cm <sup>3</sup>	Módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en tensión
$M_y =$	32314	kg·cm	(Eq. F2.1-2)
$S_f =$	13,96	cm <sup>3</sup>	Módulo elástico de la sección efectiva, calculado respecto a la fibra extrema en compresión
$M_{ne} =$	32314	kg·cm	Resistencia nominal a la flexión para la fluencia y el pandeo global. (Eq. F2.1-1)
$\phi_b M_{ne,y} =$	<b>29082</b>	<b>kg·cm</b>	<b>Resistencia de diseño en flexión para fluencia y pandeo global</b>

#### F2.1.4 Secciones de caja cerrada

$L_u =$	2926,86	cm	(Eq. F2.1.4-1)
$F_{cre} =$	522299,48	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de pandeo elástico para flexión (Eq. F2.1.4-2)
$F_n =$	2314	kg/cm <sup>2</sup>	(Eq. F2.1-3)-(Eq. F2.1-4)-(Eq. F2.1-5)

### F3 pandeo local que interactúa con la fluencia y el pandeo global

#### Comentarios

#### Alrededor del eje X

$\phi_b =$	0,90	Factor de resistencia
------------	------	-----------------------

#### F3.2 Método de fuerza directa

##### F3.2.1 Miembros sin agujeros

$k_t =$	23,9	Coficiente de pandeo de la placa	
$F_{crl} =$	76320	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de pandeo local en la fibra de compresión extrema. (Eq. 2.3.3.2-2)
$M_{crl} =$	1065754	kg·cm	Momento crítico de pandeo local elástico. (Eq. 2.3.3.2-1)
$\lambda_l =$	0,17	(Eq. F3.2.1-3)	
$M_{nl} =$	32314	kg·cm	Resistencia nominal a la flexión considerando la interacción del pandeo local y el pandeo global. (Eq. F3.2.1-1)-(Eq. F3.2.1-2)
$\phi_b M_{nl} =$	<b>29082</b>	<b>kg·cm</b>	<b>Resistencia de diseño en flexión para pandeo local que interactúa con la fluencia y el pandeo global sobre el eje X</b>

### F3 Pandeo local que interactúa con la fluencia y el pandeo global

#### Comentarios

#### Alrededor del eje Y

$\phi_b =$	0,90	Factor de resistencia
------------	------	-----------------------

#### F3.2 Método de fuerza directa

##### F3.2.1 Miembros sin agujeros

$k_t =$	23,9		Coeficiente de pandeo de la placa
$F_{cr1} =$	76320	kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo de pandeo local en la fibra de compresión extrema. (Eq. 2.3.3.2-2)
$M_{cr1} =$	1065754	kg-cm	Momento crítico de pandeo local elástico. (Eq. 2.3.3.2-1)
$\lambda_l =$	0,17		(Eq. F3.2.1-3)
$M_{nl} =$	32314	kg-cm	Resistencia nominal a la flexión considerando la interacción del pandeo local y el pandeo global. (Eq. F3.2.1-1)-(Eq. F3.2.1-2)
$\phi_b M_{nl} =$	29082	kg-cm	<b>Resistencia de diseño en flexión para pandeo local que interactúa con la fluencia y el pandeo global sobre el eje Y</b>

## G. MIEMBROS EN CORTANTE

---

### **G2. Resistencia al corte de almas sin agujeros**

### **Comentarios**

$\phi_v =$  0,95      Factor de resistencia

#### **Almas en el eje Y**

#### **G2.1 Elementos a flexión sin rigidizadores transversales de alma**

$A_w =$	2,74	cm <sup>2</sup>	Área del elemento del alma. (Eq. G2.1-6)
$k_v =$	5,34		Coeficiente de pandeo por cortante para almas no reforzadas
$V_{cr} =$	186808	kg	Fuerza de pandeo por cortante elástico. (Eq. 2.3.5-1)
$V_y =$	3803	kg	Fuerza de fluencia a cortante de la sección transversal. (Eq. G2.1-5)
$\lambda_v =$	0,14		(Eq. G2.1-4)
$V_{n,y} =$	3803	kg	Resistencia nominal al cortante (Eq. G2.1-1)-(Eq. G2.1-2a)-(Eq. G2.1-1a)
$\phi_v V_{n,y} =$	3612	kg	<b>Resistencia de diseño al cortante del alma del eje Y</b>

#### **Almas en el eje X**

#### **G2.1 Elementos a flexión sin rigidizadores transversales de alma**

$A_w =$	2,74	cm <sup>2</sup>	Área del elemento del alma. (Eq. G2.1-6)
$k_v =$	5,34		Coeficiente de pandeo por cortante para almas no reforzadas
$V_{cr} =$	186808	kg	Fuerza de pandeo por cortante elástico. (Eq. 2.3.5-1)
$V_y =$	3803	kg	Fuerza de fluencia a cortante de la sección transversal. (Eq. G2.1-5)
$\lambda_v =$	0,14		(Eq. G2.1-4)
$V_{n,x} =$	3803	kg	Resistencia nominal al cortante (Eq. G2.1-1)-(Eq. G2.1-2a)-(Eq. G2.1-1a)

$\phi_v V_{n,x} = 3612 \text{ kg}$  Resistencia de diseño al cortante del alma del eje X

### **G. PANDEO LOCALIZADO DEL ALMA (Web Crippling)**

---

**G5 esfuerzo de pandeo localizado en el alma sin agujeros**

**Comentarios**

$P_{nw} =$	6785,13	kg	Resistencia nominal al aplastamiento del alma. (Eq. G5-1)
$C =$	10		Coficiente de la tabla G5-5
$\theta =$	90	grados (°)	Ángulo entre el plano del alma y el plano de la superficie de soporte
$C_R =$	0,11		Coficiente de longitud del rodamiento de la tabla G5-5
$N =$	12,00	cm	Longitud de apoyo de la carga (mínimo 19 mm)
$C_N =$	0,14		Coficiente de longitud de apoyo de la tabla G5-5
$C_h =$	0,04		Coficiente de esbeltez del alma de la tabla G5-5
$h =$	5,78	cm	Dimensión plana del alma
$R/t =$	2		Relación entre el radio interno de dobles y el espesor de la sección
$\phi_w =$	0,85		Factor de resistencia según la tabla G5-5
$\phi_w P_{nw} =$	5767	kg	<b>Resistencia de diseño al aplastamiento del alma</b>

### **H. ELEMENTOS BAJO FUERZAS COMBINADAS**

---

$M_{alo,x} =$	32313,53	kg·cm	Resistencia disponible de un elemento flexionado en el eje X
$M_{alo,y} =$	32313,53	kg·cm	Resistencia disponible de un elemento flexionado en el eje Y
$M_{nlo,x} =$	29082,18	kg·cm	Resistencia nominal de un elemento flexionado en el eje X
$M_{nlo,y} =$	29082,18	kg·cm	Resistencia nominal de un elemento flexionado en el eje Y
$M_{axt} =$	29082	kg·cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión. (Eq. H1.1-3b)
$M_{ayt} =$	29082	kg·cm	Resistencia a la flexión disponible al considerar la fluencia por tensión. (Eq. H1.1-3b)

<b>Interacción 1</b>	0,47543	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-1)
<b>Interacción 2</b>	0,45807	Flexión y carga axial en tracción combinadas. (Eq. H1.1-2)
<b>Interacción 3</b>	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
<b>Interacción 4</b>	0,80524	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje X, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
<b>Interacción 5</b>	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)
<b>Interacción 6</b>	0,79018	Flexión y carga axial en compresión sobre el eje Y, considerando torsión (Eq. H1.2-1)
<b>Interacción 7</b>	0,47316	Flexión y cortante combinadas. (Eq. H2-1)
<b>Interacción 8</b>	0,72823	Combinación de flexión y aplastamiento del alma (Eq. H3-1b)

### Resumen

<b><math>\phi_t T_n = 13245,01</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño en tensión
<b><math>\phi_c P_{n,x} = 11947,55</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje X
<b><math>\phi_c P_{n,x} = 11947,55</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje X
<b><math>\phi_c P_{n,y} = 12381,30</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros no sujetos a pandeo torsional o flexo-torsional sobre el eje Y
<b><math>\phi_c P_{n,y} = 12381,30</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño en compresión para miembros sujetos a pandeo por torsión o por flexión-torsión sobre el eje Y
<b><math>\phi_b M_{n,x} = 29082,18</math></b>	<b>kg-cm</b>	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje X
<b><math>\phi_b M_{n,y} = 29082,18</math></b>	<b>kg-cm</b>	Resistencia de diseño en flexión alrededor del eje Y
<b><math>\phi_v V_{n,x} = 3612,39</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje X
<b><math>\phi_v V_{n,y} = 3612,39</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño al cortante de las almas del eje Y
<b><math>\phi_w P_{nw} = 5767,36</math></b>	<b>kg</b>	Resistencia de diseño al aplastamiento del alma

# Hoja: Resistencias Requeridas

Combinación de flexión y cortante. (Eq. H2-1)	0,4816758
Combinación flexión y tracción. (Eq. H1.1-1)	0,9973107
Combinación flexión y tracción. (Eq. H1.1-2)	0,9973107
Combinación flexión y compresión sobre el eje X, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)	0,9973107
Combinación flexión y compresión sobre el eje X, considerando torsión (Eq. H1.2-1)	0,9973107
Combinación flexión y compresión sobre el eje Y, sin considerar torsión (Eq. H1.2-1)	0,9973107
Combinación flexión y compresión sobre el eje Y, considerando torsión (Eq. H1.2-1)	0,9973107
Combinación de flexión y arrugado del alma (Eq. H3-1b)	0,7169385

TABLA EDITABLE											
TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P = Pu	V2 = Vuy	V3 = Vux	T	M2 = Muy	M3 = Mux	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	t	t	t	tm	tm	tm	Text	m

## Hoja: Perfiles

Perfil	t (mm)	R (mm)	h (mm)	b (mm)
12x12x0,70	0,70	1,40	12	12
12x12x0,80	0,80	1,60	12	12
12x12x0,90	0,90	1,80	12	12
12x12x0,95	0,95	1,90	12	12
12x12x1,20	1,20	2,40	12	12
19x19x0,70	0,70	1,40	19	19
19x19x0,80	0,80	1,60	19	19
19x19x0,95	0,95	1,90	19	19
19x19x1,00	1,00	2,00	19	19
19x19x1,20	1,20	2,40	19	19
19x19x1,50	1,50	3,00	19	19
22x22x0,95	0,95	1,90	22	22
22x22x1,20	1,20	2,40	22	22
22x22x1,50	1,50	3,00	22	22
25x25x0,70	0,70	1,40	25	25
25x25x0,80	0,80	1,60	25	25
25x25x0,90	0,90	1,80	25	25
25x25x1,00	1,00	2,00	25	25
25x25x1,20	1,20	2,40	25	25
25x25x1,80	1,80	3,60	25	25
31x31x0,80	0,80	1,60	31	31
31x31x0,90	0,90	1,80	31	31
31x31x0,95	0,95	1,90	31	31
31x31x1,20	1,20	2,40	31	31
31x31x1,50	1,50	3,00	31	31
31x31x1,80	1,80	3,60	31	31
38x38x0,80	0,80	1,60	38	38
38x38x0,90	0,90	1,80	38	38
38x38x0,95	0,95	1,90	38	38
38x38x1,00	1,00	2,00	38	38
38x38x1,20	1,20	2,40	38	38
38x38x1,50	1,50	3,00	38	38
38x38x1,80	1,80	3,60	38	38
31x19x0,95	0,95	1,90	31	19
31x19x1,20	1,20	2,40	31	19
38x25x0,80	0,80	1,60	38	25
38x25x0,90	0,90	1,80	38	25
38x25x0,95	0,95	1,90	38	25
38x25x1,20	1,20	2,40	38	25
38x25x1,50	1,50	3,00	38	25

44x19x1,20	1,20	2,40	44	19
50x25x0,90	0,90	1,80	50	25
50x25x0,95	0,95	1,90	50	25
50x25x1,00	1,00	2,00	50	25
50x25x1,20	1,20	2,40	50	25
50x25x1,50	1,50	3,00	50	25
50x25x1,80	1,80	3,60	50	25
50x25x2,37	2,37	4,74	50	25
50x25x3,17	3,17	6,34	50	25
72x72x1,13	1,13	2,26	72	72
72x72x1,20	1,20	2,40	72	72
72x72x1,50	1,50	3,00	72	72
72x72x1,80	1,80	3,60	72	72
72x72x2,37	2,37	4,74	72	72
72x72x3,17	3,17	6,34	72	72
91 X 91 X 1,50	1,50	3,00	91	91
91 X 91 X 1,53	1,53	3,06	91	91
91 X 91 X 1,80	1,80	3,60	91	91
91 X 91 X 1,83	1,83	3,66	91	91
96 X 48 X 1,13	1,13	2,26	96	96
96 X 48 X 1,40	1,40	2,80	96	96
96 X 48 X 1,50	1,50	3,00	96	96
96 X 48 X 1,53	1,53	3,06	96	96
96 X 48 X 1,80	1,80	3,60	96	96
96 X 48 X 1,83	1,83	3,66	96	96
96 X 48 X 2,37	2,37	4,74	96	96
96 X 48 X 3,17	3,17	6,34	96	96
100 X 100 X 1,37	1,37	2,74	100	100
100 X 100 X 1,40	1,40	2,80	100	100
100 X 100 X 1,50	1,50	3,00	100	100
100 X 100 X 1,53	1,53	3,06	100	100
100 X 100 X 1,80	1,80	3,60	100	100
100 X 100 X 1,83	1,83	3,66	100	100
100 X 100 X 2,37	2,37	4,74	100	100
100 X 100 X 3,17	3,17	6,34	100	100
100 X 100 X 4,75	4,75	9,50	100	100
150 X 100 X 1,80	1,80	3,60	150	100
150 X 100 X 2,37	2,37	4,74	150	100
150 X 100 X 3,17	3,17	6,34	150	100
150 X 100 X 4,75	4,75	9,50	150	100
150 X 50 X 1,50	1,50	3,00	150	50
150 X 50 X 1,53	1,53	3,06	150	50
150 X 50 X 1,80	1,80	3,60	150	50
150 X 50 X 1,83	1,83	3,66	150	50

150 X 50 X 2,37	2,37	4,74	150	50
150 X 50 X 3,17	3,17	6,34	150	50
150 X 50 X 4,75	4,75	9,50	150	50
150 X 150 X 2,37	2,37	4,74	150	150
150 X 150 X 3,17	3,17	6,34	150	150
150 X 150 X 4,75	4,75	9,50	150	150
200 X 50 X 2,37	2,37	4,74	200	50
200 X 50 X 3,17	3,17	6,34	200	50
200 X 100 X 2,37	2,37	4,74	200	100
200 X 100 X 3,17	3,17	6,34	200	100
200 X 100 X 4,75	4,75	9,50	200	100

# Apéndice 3. Cálculo manual.

Ejemplo II-9 del Manual de AISI (2013) desarrollado paso tras paso, mediante el método de Resistencia Directa.

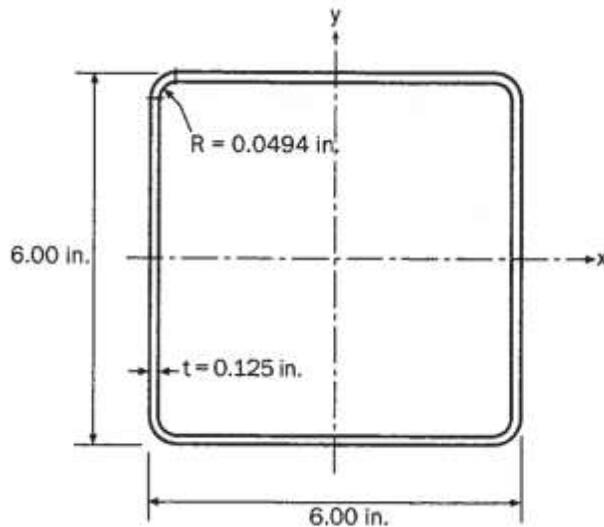


Figura X. Sección del ejemplo II-9.  
Fuente: AISI, 2013.

Datos:

- Acero:  $F_y = 46 \text{ ksi}$ .
- Sección: HSS 6X6X8 (ver figura x).
- Longitud del elemento: 10 ft.
- Elemento arriostrado lateralmente en ambos extremos.

Procedimiento de cálculo

- ✓ En primera instancia se procede a realizar una conversión de unidades

$$F_y = 46 \text{ ksi} \cdot \frac{453.59 \text{ kg}}{1 \text{ kip}} \cdot \frac{1 \text{ in}^2}{6.4516 \text{ cm}^2} = 3234.120 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Longitud} = 10 \text{ ft} \cdot \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ ft}} = 304.8 \text{ cm}$$

$$\text{Longitud de la sección} = h = 6 \text{ in} \cdot \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 15.24 \text{ cm}$$

$$\text{Espesor de la sección} = t = 0.125 \text{ in} \cdot \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 0.3175 \text{ cm}$$

$$\text{Radio de la sección} = R = 0.0494 \text{ in} \cdot \frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 0.1255 \text{ cm}$$

✓ Cálculo de propiedades

- Parámetros básicos

$$r = R + \frac{t}{2} = 0.1255 + \frac{0.3175}{2} = 0.284 \text{ cm}$$

$$h_{\text{efectiva}} = b_{\text{efectiva}} = L - 2(R + t) = 15.24 - 2(0.1255 + 0.3175) = 14.354 \text{ cm}$$

$$u = \frac{\pi r}{2} = \frac{\pi \cdot 0.284}{2} = 0.446 \text{ cm}$$

- Área transversal de la sección

$$A = t[2h_{\text{efectiva}} + 2b_{\text{efectiva}} + 4u] = 0.3175 [2 \cdot 14.354 + 2 \cdot 14.354 + 4 \cdot 0.446] = 18.796 \text{ cm}^2$$

- Momento de inercia sobre el eje x

$$l = \frac{\pi r}{2} = \frac{\pi \cdot 0.28}{2} = 0.446 \text{ cm}$$

$$c = 0.637 r = 0.637 \cdot 0.284 = 0.181$$

$$I_1 = I_2 = 0.149 r^3 = 0.149 \cdot 0.284^3 = 0.0034$$

$$I_x = I_y = t \left\{ \begin{aligned} &2 \left( \frac{h_{\text{efectiva}}^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{b_{\text{efectiva}}}{12} t^2 + b_{\text{efectiva}} \left( \frac{h-t}{2} \right)^2 \right) \\ &+ 4 I_1 + 4 l \left( \frac{h_{\text{efectiva}}}{2} + c \right)^2 \end{aligned} \right\}$$

$$= 0.3175 \left\{ \begin{aligned} &2 \left( \frac{14.354^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{14.354}{12} 0.3175^2 + 14.354 \left( \frac{15.24 - 0.3175}{2} \right)^2 \right) \\ &+ 4 \cdot 0.0034 + 4 \cdot 0.446 \left( \frac{14.354}{2} + 0.181 \right)^2 \end{aligned} \right\} = 694.667 \text{ cm}^4$$

- Módulo de sección efectiva

$$S_f = \frac{I_x}{\left( \frac{h}{2} \right)} = \frac{694.667}{\left( \frac{15.24}{2} \right)} = 91.164 \text{ cm}^3$$

- Constante de torsión de St. Venant

$$J = \frac{4((h-t) \cdot (b-t) - r^2 \cdot (4-\pi))^2 t}{2((h-t) + (b-t)) - 2r^2 \cdot (4-\pi)} = \frac{4((15.24 - 0.318) \cdot (15.24 - 0.318) - 0.284^2 \cdot (4-\pi))^2 \cdot 0.318}{2((15.24 - 0.318) + (15.24 - 0.318)) - 2 \cdot 0.284^2 \cdot (4-\pi)}$$

$$= 1058.393 \text{ cm}^4$$

- ✓ Cálculo de la resistencia para fluencia y pandeo global (lateral-torsional) en secciones de caja cerrada:

$$L_u = \frac{0.36C_b\pi}{F_y S_f} \sqrt{EGJ I} = \frac{0.36 \cdot 1 \cdot \pi}{3234.12 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 91.164 \text{ cm}^3} \sqrt{2070000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 795000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 1058.393 \text{ cm}^4 \cdot 694.667 \text{ cm}^4}$$

$$= 4219.4265 \text{ cm}$$

Como  $L_u > L$  el elemento no se encuentra sujeto a apandeo lateral, por lo tanto  $F_n = F_y$

$$M_{ne} = S_f F_n = 91.164 \text{ cm}^3 \cdot 3234.12 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 294835.3157 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

# **Anexos**

## **Anexo 1. Resultados proporcionados por el software SAP 2000.**

# SAP2000

AISI-16 COLD-FORMED STEEL SECTION CHECK  
 Units : Kgf, cm, C

Frame : 20                      Design Sect        : 100 X 100 X 2,37                      Through-Fastened To  
 Deck: No  
 X Mid : 600,                      Design Type        : Column                      Fastener Eccentricity  
 : N/A  
 Y Mid : 600,                      Frame Type         : Braced                      Fastening R Value  
 : N/A  
 Z Mid : 150,                      2nd-Order Method: General 2nd-Order                      Design Provision  
 : LRFD  
 Length : 300,                      LLRF                : 1,  
 Loc     : 0,                      Major Axis         : 0, degrees

MATERIAL PROPERTIES        E                      Fy                      Fu                      G                      U  
    2100000,                      2314,                      3160, 807692,308                      0,3

ELEMENT/SEGMENT INFO	L	K	Lg	LNet	iBraceLoc	jBraceLoc	LhRatio
Lh							
0, Major	300,	2,327	300,	0,	0,	300,	0,
0, Minor	300,	2,327	300,	0,	0,	300,	0,
0, LTB	300,	1,	300,	0,	0,	300,	0,
N/A, Distortional	300,	1,	N/A	N/A	0,	300,	N/A

SECTION PROPERTIES	rxx	ryy	Sxx Top	Sxx Bot	Syy Left	Syy Right	
GROSS	3,956	3,956	28,21	28,21	28,21	28,21	
	Ax	Ay	Ixx	Iyy	J	x0	y0
Cw, GROSS	9,014	9,014	141,052	141,052	220,546	0,	0,

RESISTANCE FACTORS	PhiTy	PhiTr	PhiC	PhiB	PhiBPipe	PhiV
	0,9	0,75	0,85	0,9	0,95	0,95

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

COMB. RATIO EQUATION - (H1.2-1)- GOVERNS THE DESIGN

$$\text{COMB. RATIO} \quad 0,811 = \frac{P/Pa}{1} + \frac{Mx/Max}{0,675} + \frac{My/May}{0,131} + \frac{0,005}{0,005}$$

COMB. RATIO LIMIT        1,

	Combo	P	M33	M22	V2	V3
DEMANDS	6-2	-3018,123	-7707,276	295,99	-40,641	1,388
CAPACITIES		4471,338	58751,001	58751,001	5362,936	5362,936
DEMAND/CAPACITY		0,675	0,131	0,005	0,008	0,

EFFECTIVE WIDTH METHOD Applicability Limits  
 All limits are satisfied

AXIAL - TENSION	Area Ag	Area An	PhiTy*Yielding Tn	PhiTr*Rupture Tn
Phi*Tension Tn	9,014	9,014	18773,066	21363,76
18773,066				

AXIAL - COMPRESSION	Fcre	LambdaC	Fn	PhiC*Pne	Buckling Axes
GLOBAL BUCKLING					
Hole Effects	Flex 665,411	1,865	583,565	4471,338**	Geometric
Not Required					

FcrlFlange	FcrlWeb	L0Major	RrMajor	L0Minor	RrMinor

# SAP2000

Project \_\_\_\_\_  
 Job Number \_\_\_\_\_  
 Engineer \_\_\_\_\_

	5795,368	5795,368	236,561	1,000E-06	236,561	1,000E-06		
LOCAL BUCKLING	Web	TopFlange	BotFlange		Lip	Corner	Total	
Stiffening Condition	S	S	S		N/A			
Hole Diameter, dh	0,	N/A	N/A		N/A	N/A		
Hole Length, Lh	0,	N/A	N/A		N/A	N/A		
k	4,	4,	4,		N/A	N/A		
Fcrl	5795,368	5795,368	5795,368		N/A	N/A		
Lambda	0,317	0,317	0,317		N/A	N/A		
Rho	1,	1,	1,		N/A	N/A		
Flat Width, w	8,578	8,578	8,578		N/A	N/A		
Effective Width, b	8,578	8,578	8,578		N/A	N/A		
Effective Area, Ae	4,066	2,033	2,033		N/A	0,882	9,014	
Global stress, Fn	583,565	583,565	583,565		N/A	583,565	583,565	
PhiC*Pnl	2016,845	1008,423	1008,423		N/A	437,648	4476,298	
Hole at This Location	NO							
DISTORT. BUCKLING Not Required								
** FLEXURAL BUCKLING governs AXIAL COMPRESSION CAPACITY								
FLEXURE								
	YIELDING	Fy	Sfy	SfyNet	PhiB*My	PhiB*MyNet		
At Hole	Major	2314,	28,21	N/A	58751,001**	N/A		
NO	Minor	2314,	28,21	N/A	58751,001**	N/A		
NO								
GLOBAL BUCKLING Fcre Fn Sf PhiB*Mne Buckling Axes								
Hole Effects	Major	N/A	2314,	28,21	58751,001	Geometric		
Not Required	Minor	N/A	2314,	28,21	58751,001	Geometric		
Not Required								
		Cb	Cs	CTF	j	Lu	Sigma_ex	Sigma_ey
Sigma_et	Major	2,19	1,	0,367	0,	8713,596	665,411	665,411
631443,873	Minor	2,157	1,	0,437	0,	8582,29		
LOCAL BUCKLING Ie Eff. N.A. Se Set PhiB*Mnl PhiB*Set*Fy								
At hole	Major	141,052	5,	28,21	28,21	58751,001		58751,001
NO	Minor	141,052	5,	28,21	28,21	58751,001		58751,001
NO								
EFFECTIVE WIDTH Web Top Web Bot Web TopFlange BotFlange Top Lip								
Bot Lip	Major							
N/A	Stiffening Condition	S	N/A	N/A	S	S	N/A	
N/A	Stress Condition	Grad	N/A	N/A	Tension	UniComp	N/A	
N/A	Buckling stress, Fn	2314,	N/A	N/A	2314,	2314,	N/A	
N/A	f1	-1984,949	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A	f2	1984,949	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A	f	-1984,949	N/A	N/A	2314,	-2314,	N/A	
N/A	Psi	1,	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A	k	24,	N/A	N/A	N/A	4,	N/A	
N/A	Fcrl	34772,207	N/A	N/A	N/A	5795,368	N/A	

# SAP2000

N/A								
	Lambda	0,239	N/A	N/A	N/A	0,632	N/A	
N/A								
	Rho	1,	N/A	N/A	N/A	1,	N/A	
N/A								
	Flat Width, w	8,578	N/A	N/A	8,578	8,578	N/A	
N/A								
	Effective Width, b (be)	8,578	N/A	N/A	8,578	8,578	N/A	
N/A								
	Effective Width, b1	2,145	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Effective Width, b2	4,289	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	ho/bo	1,	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Minor Stiffening Condition	S			S	S	N/A	
N/A								
	Stress Condition	UniComp			Grad	Grad	N/A	
N/A								
	Buckling stress, Fn	2314,			2314,	2314,	2314,	
2314,								
	f1	N/A			-1984,949	-1984,949	N/A	
N/A								
	f2	N/A			1984,949	1984,949	N/A	
N/A								
	f	-2314,			-1984,949	-1984,949	N/A	
N/A								
	Psi	N/A			1,	1,	N/A	
N/A								
	k	4,			24,	24,	N/A	
N/A								
	Fcr1	5795,368			34772,207	34772,207	N/A	
N/A								
	Lambda	0,632			0,239	0,239	N/A	
N/A								
	Rho	1,			1,	1,	N/A	
N/A								
	Flat Width, w	8,578			8,578	8,578	N/A	
N/A								
	Effective Width, b (be)	8,578			8,578	8,578	N/A	
N/A								
	Effective Width, b1	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Effective Width, b2	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	ho/bo	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	DISTORT. BUCKLING	Not Required						
	** YIELDING of GROSS SECTION governs MAJOR MOMENT CAPACITY							
	** YIELDING of GROSS SECTION governs MINOR MOMENT CAPACITY							
	SHEAR kv Fcr LambdaV Vcr Fy Aw Vy PhiV*Vn							
At Hole								
Major	5,34	7736,816	0,424	31457,677	2314,	4,066	5645,196	5362,936
NO								
Minor	5,34	7736,816	0,424	31457,677	2314,	4,066	5645,196	5362,936
NO								
	S: Stiffened							
	U/S: Unstiffened							
	P/S: Partially Stiffened							
	UniComp: Uniform Compression							
	Grad: Stress Gradient							

# SAP2000

Project \_\_\_\_\_  
Job Number \_\_\_\_\_  
Engineer \_\_\_\_\_

None: No Stress

N/A: Not Applicable  
N/C: Not Calculated  
N/N: Not Needed



# SAP2000

Project \_\_\_\_\_  
 Job Number \_\_\_\_\_  
 Engineer \_\_\_\_\_

	12773,15	12773,15	113,235	0,751	113,235	0,864		
LOCAL BUCKLING	Web	TopFlange	BotFlange	Lip	Corner	Total		
Stiffening Condition	S	S	S	N/A				
Hole Diameter, dh	0,	N/A	N/A	N/A	N/A			
Hole Length, Lh	0,	N/A	N/A	N/A	N/A			
k	4,	4,	4,	N/A	N/A			
Fcrl	12773,15	12773,15	12773,15	N/A	N/A			
Lambda	0,416	0,416	0,416	N/A	N/A			
Rho	1,	1,	1,	N/A	N/A			
Flat Width, w	5,778	5,778	5,778	N/A	N/A			
Effective Width, b	5,778	5,778	5,778	N/A	N/A			
Effective Area, Ae	2,739	1,369	1,369	N/A	0,882	6,36		
Global stress, Fn	2210,085	2210,085	2210,085	N/A	2210,085	2210,085		
PhiC*Pnl	5144,98	2572,49	2572,49	N/A	1657,465	11966,212		
Hole at This Location	NO							
DISTORT. BUCKLING Not Required								
** FLEXURAL BUCKLING governs AXIAL COMPRESSION CAPACITY								
FLEXURE								
	YIELDING	Fy	Sfy	SfyNet	PhiB*My	PhiB*MyNet		
At Hole	Major	2314,	13,96	N/A	29072,999**	N/A		
NO	Minor	2314,	13,96	N/A	29072,999**	N/A		
NO								
GLOBAL BUCKLING Fcre Fn Sf PhiB*Mne Buckling Axes								
Hole Effects	Major	N/A	2314,	13,96	29072,999	Geometric		
Not Required	Minor	N/A	2314,	13,96	29072,999	Geometric		
Not Required								
		Cb	Cs	CTF	j	Lu	Sigma_ex	Sigma_ey
Sigma_et	Major	2,819	1,	0,85	0,	8151,927	126228,776	28237,811
642934,908	Minor	1,034	1,	1,	0,	2991,024		
LOCAL BUCKLING Ie Eff. N.A. Se Set PhiB*Mnl PhiB*Set*Fy								
At hole	Major	50,256	3,6	13,96	13,96	29072,999		29072,999
NO	Minor	50,256	3,6	13,96	13,96	29072,999		29072,999
NO								
EFFECTIVE WIDTH Web Top Web Bot Web TopFlange BotFlange Top Lip								
Bot Lip	Major							
N/A	Stiffening Condition	S	N/A	N/A	S	S		N/A
N/A	Stress Condition	Grad	N/A	N/A	Tension	UniComp		N/A
N/A	Buckling stress, Fn	2314,	N/A	N/A	2314,	2314,		N/A
N/A	f1	-1856,985	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A
N/A	f2	1856,985	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A
N/A	f	-1856,985	N/A	N/A	2314,	-2314,		N/A
N/A	Psi	1,	N/A	N/A	N/A	N/A		N/A
N/A	k	24,	N/A	N/A	N/A	4,		N/A
N/A	Fcrl	76638,9	N/A	N/A	N/A	12773,15		N/A

# SAP2000

N/A								
	Lambda	0,156	N/A	N/A	N/A	0,426	N/A	
N/A								
	Rho	1,	N/A	N/A	N/A	1,	N/A	
N/A								
	Flat Width, w	5,778	N/A	N/A	5,778	5,778	N/A	
N/A								
	Effective Width, b (be)	5,778	N/A	N/A	5,778	5,778	N/A	
N/A								
	Effective Width, b1	1,445	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Effective Width, b2	2,889	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	ho/bo	1,	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Minor Stiffening Condition	S			S	S	N/A	
N/A								
	Stress Condition	UniComp			Grad	Grad	N/A	
N/A								
	Buckling stress, Fn	2314,			2314,	2314,	2314,	
2314,								
	f1	N/A			-1856,985	-1856,985	N/A	
N/A								
	f2	N/A			1856,985	1856,985	N/A	
N/A								
	f	-2314,			-1856,985	-1856,985	N/A	
N/A								
	Psi	N/A			1,	1,	N/A	
N/A								
	k	4,			24,	24,	N/A	
N/A								
	Fcr1	12773,15			76638,9	76638,9	N/A	
N/A								
	Lambda	0,426			0,156	0,156	N/A	
N/A								
	Rho	1,			1,	1,	N/A	
N/A								
	Flat Width, w	5,778			5,778	5,778	N/A	
N/A								
	Effective Width, b (be)	5,778			5,778	5,778	N/A	
N/A								
	Effective Width, b1	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	Effective Width, b2	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	ho/bo	N/A			N/A	N/A	N/A	
N/A								
	DISTORT. BUCKLING	Not Required						
	** YIELDING of GROSS SECTION governs MAJOR MOMENT CAPACITY							
	** YIELDING of GROSS SECTION governs MINOR MOMENT CAPACITY							
	SHEAR kv Fcr LambdaV Vcr Fy Aw Vy PhiV*Vn							
At Hole								
Major	5,34	17052,155	0,285	46701,965	2314,	2,739	3802,511	3612,385
NO								
Minor	5,34	17052,155	0,285	46701,965	2314,	2,739	3802,511	3612,385
NO								
	S: Stiffened							
	U/S: Unstiffened							
	P/S: Partially Stiffened							
	UniComp: Uniform Compression							
	Grad: Stress Gradient							

Project \_\_\_\_\_  
Job Number \_\_\_\_\_  
Engineer \_\_\_\_\_

# SAP2000

None: No Stress

N/A: Not Applicable  
N/C: Not Calculated  
N/N: Not Needed

# SAP2000

```

AISI-16 COLD-FORMED STEEL SECTION CHECK
Units : Kgf, cm, C

Frame : 272          Design Sect   : C 150 X 50 X 15 X 3.17    Through-Fastened To
Deck: No
X Mid  : 522,       Design Type   : Beam                Fastener Eccentricity
: N/A
Y Mid  : 450,       Frame Type    : Braced              Fastening R Value
: N/A
Z Mid  : 336,       2nd-Order Method: General 2nd-Order    Design Provision
: LRFD
Length : 300,       LLRF         : 1,
Loc    : 150,       Major Axis   : 0, degrees

MATERIAL PROPERTIES      E          Fy          Fu          G          U
                        2100000,    2314,        3160, 807692,308    0,3

ELEMENT/SEGMENT INFO    L          K          Lg          LNet    iBraceLoc    jBraceLoc    LhRatio
Lh
0,      Major    300,        1,          300,        0,         0,         300,        0,
0,      Minor    300,        1,          300,        0,         0,         300,        0,
0,      LTB      300,        1,          300,        0,         0,         300,        0,
N/A     Distortional 300,        1,          N/A         N/A        0,         300,        N/A

SECTION PROPERTIES      rxx         ryy         Sxx Top     Sxx Bot     Syy Left    Syy Right
GROSS                5,66        1,696       34,349      34,349      16,611      6,412

Cw                    Ax          Ay          Ixx         Iyy          J           x0           y0
1146,562             8,043      8,043      257,615    23,132      0,269      -3,318      0,

RESISTANCE FACTORS     PhiTy      PhiTr       PhiC        PhiB        PhiBPipe    PhiV
                    0,9        0,75        0,85        0,9         0,95        0,95

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
  COMB. RATIO EQUATION - (H1.1-2)- GOVERNS THE DESIGN
      COMB. RATIO 0,928 = Mx/Max + My/May - T/Ta
  COMB. RATIO LIMIT 1,

      Combo      P      M33      M22      V2      V3
  DEMANDS      6-2      0,      20942,264      -6282,98      0,      0,
  CAPACITIES      3970,994      48994,963      12547,936      5476,492      2590,651
  DEMAND/CAPACITY      0,      0,501      0,427      0,

EFFECTIVE WIDTH METHOD Applicability Limits
  All limits are satisfied

AXIAL - TENSION      Area Ag      Area An      PhiTy*Yielding Tn      PhiTr*Rupture Tn
Phi*Tension Tn
                    8,043      8,043      16749,813      19061,297
16749,813

AXIAL - COMPRESSION
  GLOBAL BUCKLING      Fcre      LambdaC      Fn      PhiC*Pne      Buckling Axes
Hole Effects      Flex 662,333      1,869      580,866      3970,994**      Geometric
Not Required
Flex-Tor 1243,68      1,364      1062,072      7260,675      Geometric
Not Required
  
```

# SAP2000

Project \_\_\_\_\_  
 Job Number \_\_\_\_\_  
 Engineer \_\_\_\_\_

	x0	y0	r0	beta	Sigma_ex	Sigma_ey	Sigma_t	
	-3,318	0,	6,776	0,76	7376,376	662,333	1304,164	
LOCAL BUCKLING	Web	TopFlange	BotFlange	Lip	Corner	Total		
Stiffening Condition	S	P/S	P/S	U/S	N/A			
Hole Diameter, dh	0,	N/A	N/A	N/A	N/A			
Hole Length, Lh	0,	N/A	N/A	N/A	N/A			
w/t <= 0.328S	N/A	Yes	Yes	N/A	N/A			
S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
n	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
Ia	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
Is	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
RI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
k	4,	N/A	N/A	N/A	0,43			
Fcrl	4446,978	N/A	N/A	272106,36	N/A			
Lambda	0,361	N/A	N/A	0,046	N/A			
Rho	1,	N/A	N/A	1,	N/A			
Flat Width, w	13,098	3,098	3,098	0,549	N/A			
Effective Width, b	13,098	3,098	3,098	0,549	N/A			
Effective Area, Ae	4,152	0,982	0,982	0,348	1,578	8,043		
Global stress, Fn	580,866	580,866	580,866	580,866	580,866	580,866		
PhiC*Pnl	2050,026	484,882	484,882	171,853	779,352	3970,994		
Hole at This Location	NO							
DISTORT. BUCKLING	Py	Pcrd	LambdaD	PhiC*Pnd				
At hole	18610,904	43036,719	0,658	15344,849				
NO								
kPhi_wg	Fcrd	L	Lcrd	Lm	kPhi_fe	kPhi_we	kPhi	kPhi_fg
0,185	5351,001	30,871	30,871	300,	1351,879	816,795	0,	0,221
hyf(yof)	Af	Jf	Ixf	Iyf	Ixyf	Cwf	xof	hxf
-0,149	1,91	0,064	0,225	4,525	0,519	0,	1,82	-2,863
** FLEXURAL BUCKLING governs AXIAL COMPRESSION CAPACITY								
FLEXURE	YIELDING	Fy	Sfy	SfyNet	PhiB*My	PhiB*MyNet		
At Hole	Major	2314,	34,349	N/A	71534,448	N/A		
NO	Minor	2314,	16,611	N/A	34594,281	N/A		
NO								
GLOBAL BUCKLING	Fcre	Fn	Sf	PhiB*Mne	Buckling Axes			
Hole Effects	Major	1675,75	1584,892	34,349	48994,963**	Geometric		
Not Required	Minor	4165,3	2174,342	6,412	12547,936**	Geometric		
Not Required								
Sigma_et	Cb	Cs	CTF	j	Lu	Sigma_ex	Sigma_ey	
1304,164	Major	1,136	1,	1,	0,	N/A	7376,376	662,333
	Minor	1,136	-1,	1,	8,792	N/A		
LOCAL BUCKLING	Ie	Eff. N.A.	Se	Set	PhiB*Mnl	PhiB*Set*Fy		
At hole	Major	257,615	7,5	34,349	34,349	48994,963	71534,448	
NO	Minor	23,132	1,393	6,412	16,611	12547,936	34594,281	

# SAP2000

NO		Web	Top Web	Bot Web	TopFlange	BotFlange	Top Lip
Bot Lip	EFFECTIVE WIDTH						
	Major						
U/S	Stiffening Condition	S	N/A	N/A	P/S	P/S	U/S
Tension	Stress Condition	Grad	N/A	N/A	UniComp	Tension	Grad
1584,892	Buckling stress, Fn	1584,892	N/A	N/A	1584,892	1584,892	1584,892
1267,913	f1	-1383,927	N/A	N/A	N/A	N/A	-1383,927
1383,927	f2	1383,927	N/A	N/A	N/A	N/A	-1267,913
1267,913	f	-1383,927	N/A	N/A	-1584,892	1584,892	-1383,927
1,092	Psi	1,	N/A	N/A	N/A	N/A	0,916
N/A	w/t <= 0.328S	N/A	N/A	N/A	Yes	N/A	N/A
N/A	S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	n	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	Ia	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	Is	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	RI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	k	24,	N/A	N/A	N/A	N/A	0,46
N/A	Fcrl	26681,866	N/A	N/A	N/A	N/A	291171,938
N/A	Lambda	0,228	N/A	N/A	N/A	N/A	0,069
N/A	Rho	1,	N/A	N/A	N/A	N/A	1,
0,549	Flat Width, w	13,098	N/A	N/A	3,098	3,098	0,549
0,549	Effective Width, b (be)	13,098	N/A	N/A	3,098	3,098	0,549
N/A	Effective Width, b1	3,275	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	Effective Width, b2	6,549	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	ho/bo	3,	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Minor						
U/S	Stiffening Condition	S			S	S	U/S
UniComp	Stress Condition	Tension			Grad	Grad	UniComp
2174,342	Buckling stress, Fn	2174,342			2174,342	2174,342	2174,342
N/A	f1	N/A			-1601,142	-1601,142	N/A
N/A	f2	N/A			266,127	266,127	N/A
-2174,342	f	839,327			-1601,142	-1601,142	-2174,342
N/A	Psi	N/A			0,166	0,166	N/A
0,43	k	N/A			9,505	9,505	0,43
272106,36	Fcrl	N/A			188880,52	188880,52	272106,36
0,089	Lambda	N/A			0,092	0,092	0,089
	Rho	N/A			1,	1,	1,

# SAP2000

1,	Flat Width, w	13,098		3,098	3,098	0,549			
0,549	Effective Width, b (be)	13,098		3,098	3,098	0,549			
0,549	Effective Width, b1	N/A		0,978	0,978	N/A			
N/A	Effective Width, b2	N/A		2,12	2,12	N/A			
N/A	ho/bo	N/A		0,333	0,333	N/A			
N/A									
	DISTORT. BUCKLING	My	Mcrd	LambdaD	PhiB*Mnd				
		79482,72	390378,07	0,451	71534,448				
	Fcrd	L	Lcrd	Lm	kPhi_fe	kPhi_we	kPhi	kPhi_fg	
kPhi_wg	11365,173	27,974	27,974	300,	1863,155	1605,9	0,	0,269	
0,037									
	beta	XiWeb	At hole						
	1,	2,	NO						
	Af	Jf	Ixf	Iyf	Ixyf	Cwf	xof	hxf	
hyf(yof)	1,91	0,064	0,225	4,525	0,519	0,	1,82	-2,863	
-0,149									
	** LATERAL-TORSIONAL BUCKLING governs MAJOR MOMENT CAPACITY								
	** LATERAL-TORSIONAL BUCKLING governs MINOR MOMENT CAPACITY								
	SHEAR	kv	Fcr	LambdaV	Vcr	Fy	Aw	Vy	PhiV*Vn
At Hole	Major	5,34	5936,715	0,484	24649,633	2314,	4,152	5764,728	5476,492
NO	Minor	5,34	106119,051	0,114	208431,823	2314,	1,964	2727,001	2590,651
NO									
	S: Stiffened								
	U/S: Unstiffened								
	P/S: Partially Stiffened								
	UniComp: Uniform Compression								
	Grad: Stress Gradient								
	None: No Stress								
	N/A: Not Applicable								
	N/C: Not Calculated								
	N/N: Not Needed								

# SAP2000

AISI-16 COLD-FORMED STEEL SECTION CHECK  
 Units : Kgf, cm, C

Frame : 248 Design Sect : Z 200 X 50 X 15 X 2.37 Through-Fastened To  
 Deck: No Design Type : Beam Fastener Eccentricity  
 X Mid : 4, Y Mid : 450, Frame Type : Braced Fastening R Value  
 : N/A Z Mid : 318, 2nd-Order Method: General 2nd-Order Design Provision  
 : LRFD Length : 300, LLRF : 1,  
 Loc : 150, Major Axis : 0, degrees

MATERIAL PROPERTIES E Fy Fu G U  
 2100000, 2314, 3160, 807692,308 0,3

ELEMENT/SEGMENT INFO	L	K	Lg	LNet	iBraceLoc	jBraceLoc	LhRatio
Lh							
Major	300,	1,	300,	0,	0,	300,	0,
Minor	300,	1,	300,	0,	0,	300,	0,
LTB	300,	1,	300,	0,	0,	300,	0,
Distortional	300,	1,	N/A	N/A	0,	300,	N/A
N/A							

SECTION PROPERTIES	rxx	ryy	Sxx Top	Sxx Bot	Syy Left	Syy Right	
GROSS	7,49	2,205	42,186	42,186	6,256	6,256	
	Ax	Ay	Ixx	Iyy	J	x0	y0
Cw							
GROSS	7,519	7,519	421,864	36,571	0,141	0,	0,
2690,829							

RESISTANCE FACTORS	PhiTy	PhiTr	PhiC	PhiB	PhiBPipe	PhiV
	0,9	0,75	0,85	0,9	0,95	0,95

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

COMB. RATIO EQUATION - (H1.1-2)- GOVERNS THE DESIGN

COMB. RATIO 0,998 =  $\frac{M_x/Max}{0,48} + \frac{M_y/May}{0,518} - \frac{T/Ta}{0}$   
 COMB. RATIO LIMIT 1,

DEMANDS	Combo	P	M33	M22	V2	V3
6-2		0,	-20835,932	-6251,079	0,	0,
CAPACITIES		5670,982	40188,509	13028,998	5158,864	2474,187
DEMAND/CAPACITY		0,	0,48	0,518	0,	0,

EFFECTIVE WIDTH METHOD Applicability Limits  
 All limits are satisfied

AXIAL - TENSION	Area Ag	Area An	PhiTy*Yielding Tn	PhiTr*Rupture Tn
Phi*Tension Tn	7,519	7,519	15658,864	17819,796
15658,864				

AXIAL - COMPRESSION	Fcre	LambdaC	Fn	PhiC*Pne	Buckling Axes
GLOBAL BUCKLING					
Hole Effects	Flex 1120,11	1,437	974,638	6228,978	Principal
Not Required					
Flex-Tor 1599,74	1,203	1263,077	8072,409		Principal
Not Required					





# SAP2000

N/A	Rho	N/A		1,	N/A	1,		
1,168	Flat Width, w	18,578		3,957	3,957	1,168		
1,168	Effective Width, b (be)	18,578		3,957	3,957	1,168		
N/A	Effective Width, b1	N/A		N/A	N/A	N/A		
N/A	Effective Width, b2	N/A		N/A	N/A	N/A		
N/A	ho/bo	N/A		N/A	N/A	N/A		
	DISTORT. BUCKLING	My	Mcrd	LambdaD	PhiB*Mnd			
		97619,281	205717,178	0,689	86807,757			
kPhi_wg	Fcrd	L	Lcrd	Lm	kPhi_fe	kPhi_we	kPhi	kPhi_fg
0,052	4876,389	30,779	30,779	300,	604,166	562,176	0,	0,187
	beta	XiWeb	At hole					
	1,	2,	NO					
hyf(yof)	Af	Jf	Ixf	Iyf	Ixyf	Cwf	xof	hxf
-0,119	1,456	0,027	0,107	4,182	0,379	0,	1,746	-3,017
	** LATERAL-TORSIONAL BUCKLING governs MAJOR MOMENT CAPACITY							
	** YIELDING of GROSS SECTION governs MINOR MOMENT CAPACITY							
SHEAR	kv	Fcr	LambdaV	Vcr	Fy	Aw	Vy	PhiV*Vn
At Hole								
Major	5,34	1649,44	0,917	7262,46	2314,	4,403	6113,106	5158,864
NO								
Minor	5,34	36349,825	0,195	68186,23	2314,	1,876	2604,408	2474,187
NO								
	S: Stiffened							
	U/S: Unstiffened							
	P/S: Partially Stiffened							
	UniComp: Uniform Compression							
	Grad: Stress Gradient							
	None: No Stress							
	N/A: Not Applicable							
	N/C: Not Calculated							
	N/N: Not Needed							