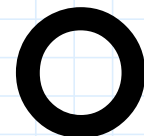
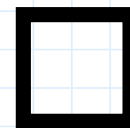


COLD-FORMED STEEL N°5

DICIEMBRE, 2022

Serie: Perfiles conformados o doblados en frío.

RESISTENCIA POR CARGAS CONCÉNTRICAS DE SECCIONES TUBULARES



AISI S100-07 -North American Specification
for the Design of Cold-Formed Steel
Structural Members, 2007.

MÉTODO DE LOS ESTADOS LIMITES, LRFD

Angel Manrique
Ingeniero Civil Especialista en Estructuras

INDICE

03

INTRODUCCIÓN

03

OBJETIVO

03

BASES PARA EL DISEÑO

04

CALIDAD DE LOS MATERIALES. ACERO ESTRUCTURAL

04

GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE APOYO

05

LIMITE DE ESBELTEZ DE DE MARCOS DIAGONALIZADOS SEGÚN NCH2369

05

DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE DE SECCIONES CUADRADAS Y RECTANGULARES

10

DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE DE SECCIONES CIRCULARES

01 INTRODUCCION

Los elementos de acero cuya sección transversal se logra mediante el plegado o doblado de planchas de acero al carbono a temperatura ambiente, se denominan perfiles conformados o laminados en frío.

En naves industriales de acero es prácticamente imprescindible el uso de sistemas de contravientos para aumentar la rigidez lateral en el sentido longitudinal de la estructura. Para los contravientos se suelen utilizar perfiles tubulares cuadrados o circulares. Esto debido a que, se prefiere que el contraviento tenga aproximadamente la misma capacidad en ambos ejes principales, por lo que en la práctica es común que los contravientos sean perfiles tubulares. Sin embargo, el diseño del contraviento queda usualmente definido por la capacidad de este al pandeo global en compresión en el plano perpendicular al eje del marco, por lo que no es imprescindible, que la capacidad en ambos ejes principales sea la misma.

En los sistemas con configuraciones de arriostramientos en X, las diagonales comprimidas desarrollan su capacidad residual fallando por la plastificación o pandeo del elemento. Por otro lado en las diagonales traccionadas se presenta su capacidad esperada.

02 OBJETIVO

El presente documento está referido al diseño mediante el método de los estados limites por de capacidad resistente a carga axial en compresión para elementos de sección transversal tipo tubular.

03 BASES PARA EL DISEÑO

Normas Nacionales

1. NCh 1537.Of2009 - Diseño Estructural - Cargas Permanentes y Cargas de Uso.
2. NCh 2369.Of2003 - Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales.
3. NCh 3171.Of2010 - Diseño Estructural - Disposiciones Generales y Combinaciones de Carga.

Normas Internacionales

1. AISI S100-07. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
2. ANSI/AISC 360-10. Specification for Structural Steel Buildings
3. ASCE/SEI7. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures

Documentos Técnicos

1. CIDECT 7 Guía de diseño para la fabricación ensamble y montaje de estructuras de perfiles tubulares
2. Publicación ICHA "Especificaciones Norteamericanas para el Diseño de Miembros Estructurales Conformados en Frío", 2009).

04 CALIDAD DE LOS MATERIALES. ACERO ESTRUCTURAL

Esfuerzo del fluencia	$f_{ys} := 250 \text{ MPa}$	Modulo de elasticidad	$E_s := 200000 \text{ MPa}$
Peso unitario del acero	$\gamma_a := 7850 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	Modulo de Poisson	$\mu := 0.3$
		Modulo de corte	$G_s := \frac{E_s}{2(1+\mu)} = 76923.08 \text{ MPa}$

05 GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE APOYO

5.1. CONDICIONES DE APOYO

Separación entre apoyos de la viga $L_x := 6000 \text{ mm}$

Altura del hombro del marco desde tope de pedestal
Lzmax=15000 mm. NCh 2369 Of2003 Art. 11.2.1 $L_z := 6000 \text{ mm}$

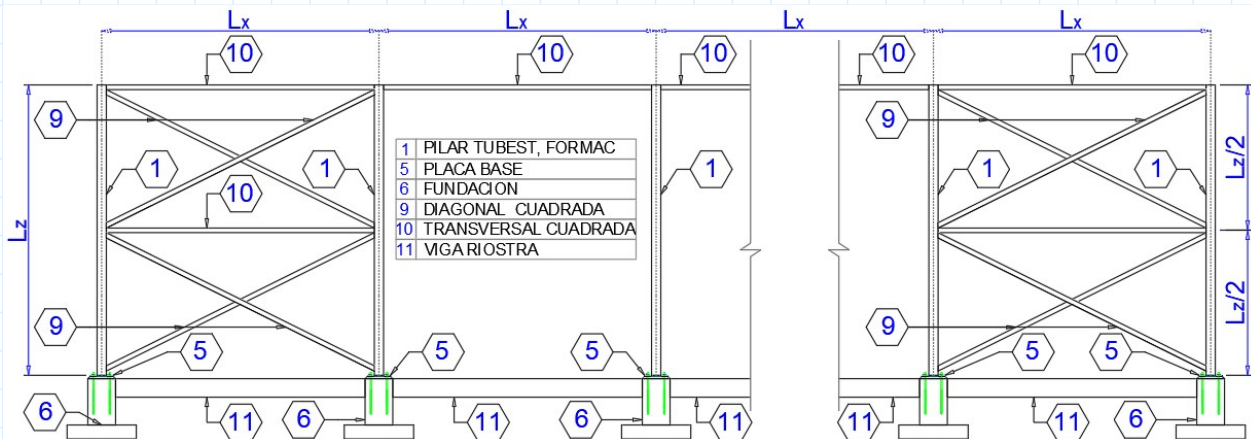
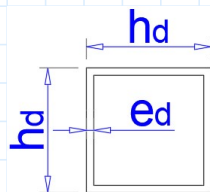


Figura 1. Imagen referencial de marcos de cerramiento y contravientos

5.2 PERFILES ESTRUCTURALES (9 Y 10 DIAGONALES Y TRANSVERSALES)



$$h_d := 100 \text{ mm}$$

$$e_d := 4 \text{ mm}$$

Área neta	$A_d = 14.95 \text{ cm}^2$	Radio de giro X	$r_{dx} = 3.89 \text{ cm}$
Área Esquinas	$A_{esqd} = 1.51 \text{ cm}^2$	Radio de giro Y	$r_{dy} = 3.89 \text{ cm}$
Peso por ml	$P_{dml} = 11.73 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	Const. Torsionante	$J_d = 237.08 \text{ cm}^4$
Inercia en X	$I_{dx} = 225.99 \text{ cm}^4$	Const. Alabeo	$C_{wd} = 1 \text{ cm}^6$
Inercia en Y	$I_{dy} = 225.99 \text{ cm}^4$	Radio de giro polar	$r_{od} = 81.39 \text{ mm}$

06 LIMITE DE ESBELTEZ DE DE MARCOS DIAGONALIZADOS SEGÚN NCH2369

6.1. LIMITE DE ESBELTEZ DE CONTRAVIENTOS EN COMPRESIÓN

Altura libre de ala y alma de contraviento $b_c := h_d - 2 e_d = 92 \text{ mm}$

Relación ancho/espesor de diagonal cuadrada $\lambda_{cc} := \frac{b_c}{e_d} = 23$

Límite de ancho/espesor
Tabla 8.1 NCh 2369 Of.2003 $\lambda_r := 1.4 \cdot \sqrt[2]{\frac{E_s}{f_{ys}}} = 39.6$

if $\lambda_r \geq \lambda_{cc}$ = "OK"
|| "OK"
else
|| "FAIL"

Longitud del contraviento $L_{cv} := \sqrt[2]{\left(\frac{L_z}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_x}{2}\right)^2}$
 $L_{cv} = 4.24 \text{ m}$

Radio de giro del contraviento $r_{dx} = 3.89 \text{ cm}$

Coefficiente de longitud efectiva $K_{cv} := 1$

Esbeltez del perfil $E_{cv} := \frac{K_{cv} \cdot L_{cv}}{r_{dx}} = 109.11$

Límite de esbeltez
Tabla 8.1 NCh 2369 Of.2003 $E_{lim} := 1.5 \cdot \pi \cdot \sqrt[2]{\frac{E_s}{f_{ys}}}$
 $E_{lim} = 133.29$

if $E_{lim} \geq E_{cv}$ = "OK"
|| "OK"
else
|| "FAIL"

07 DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE DE SECCIONES CUADRADAS Y RECTANGULARES

7.1. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Limitaciones y consideraciones sobre las dimensiones

Relación de esbeltez de los elementos

Relación entre el ancho plano de las alas y su espesor $R_{ala} := \frac{h_d - e_d}{e_d} \leq 60$ $R_{ala} = \text{"OK"}$
Art. B.1.1a AISI 2007

Relación entre la profundidad del alma y su espesor $R_{alma} := \frac{h_d - e_d}{e_d} \leq 100$ $R_{alma} = \text{"OK"}$
Art. B.1.2a AISI 2007

7.2. VERIFICACIÓN POR PANDEO LOCAL

Ala en compresión rigidizadas

Coefficiente de pandeo de placas $k_{sl} := 4 \checkmark$

Ancho real plano del ala $w_{slf} := b = 84 \text{ mm}$

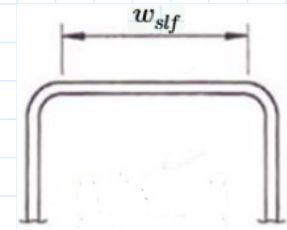


Figura 2. Ancho de ala

Tensión de pandeo elástico de la placa
Eq. B2.1-5 AISI 2007 $F_{crslf} := k_{sl} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_s}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{e_d}{w_{slf}}\right)^2 = 1639.56 \text{ MPa}$

Pandeo local del ala en compresión $Pandeo_f = F_{crslf} \geq f_{ys}$ **Pandeo_f = "OK"**

Almas en compresión rigidizadas

Coefficiente de pandeo de placas $k_{sl} = 4$

Alto real plano del alma $w_{slw} := a = 84 \text{ mm}$

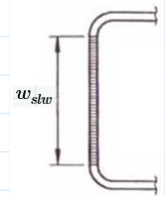


Figura 3. Alto de alma

Tensión de pandeo elástico de la placa
Eq. B2.1-5 AISI 2007 $F_{crslw} := k_{sl} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_s}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{e_d}{w_{slw}}\right)^2 = 1639.56 \text{ MPa}$

Pandeo local del alma $Pandeo_w = F_{crslw} \geq f_{ys}$ **Pandeo_w = "OK"**

7.3. INCREMENTO DE LA RESISTENCIA DEBIDO AL CONFORMADO EN FRÍO

Las propiedades mecánicas del acero en la zona de las esquinas cambia de manera significativa debido en mayor medida a que reciben mas esfuerzo durante el proceso de doblado. Se tiene entonces un incremento en el esfuerzo de fluencia f_{ys} y de la tensión ultima F_u , pero este ultimo en menor medida, por tanto, se reduce de manera significativa la ductilidad del perfil. Las partes planas también sufren un incremento del esfuerzo de fluencia y de tensión ultima, pero en menor medida al incremento originado en las esquinas.

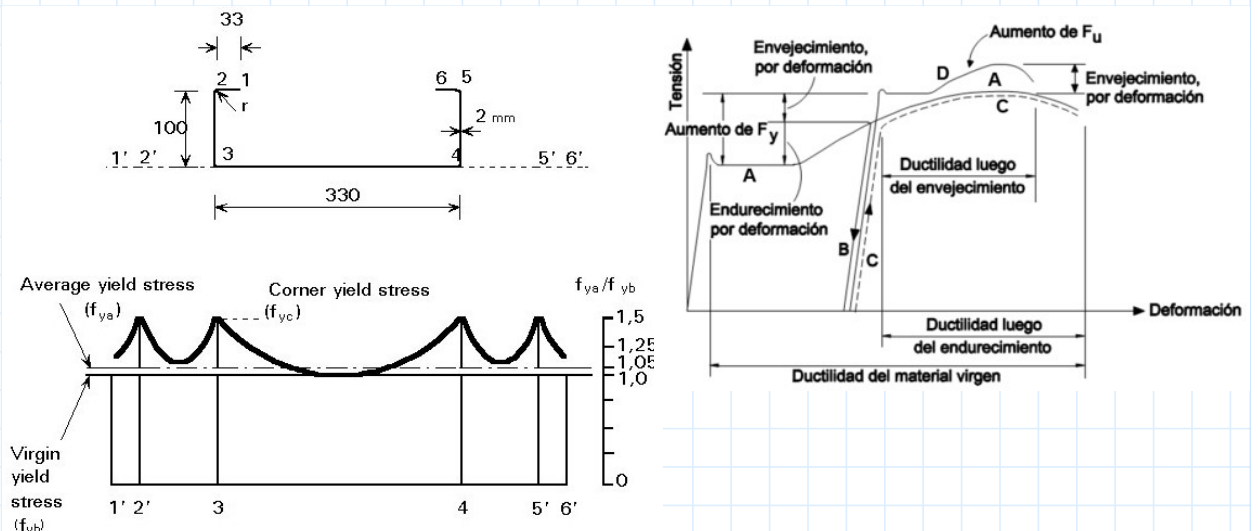


Figura 4. Efectos del conformado en frío sobre el límite elástico. Fuente: ICHA. Doc. Tec Ref. 1

El esfuerzo de fluencia medio de la sección depende entonces del número de esquinas y del ancho de los elementos planos.

Razón entre el área de las esquinas y el área total de la sección transversal $C_d := \frac{A_{esqd}}{A_d} = 0.1$

Tensión de fluencia del material virgen $F_{yd} := f_{ys} = 250 \text{ MPa}$

Tensión última del material virgen $F_{ud} = 400 \text{ MPa}$

Factor Bv (Eq. A7.2-3 AISI 2007) $B_d := 3.69 \cdot \left(\frac{F_{ud}}{F_{yd}}\right) - 0.819 \cdot \left(\frac{F_{ud}}{F_{yd}}\right)^2 - 1.79 = 2.02$

Factor m (Eq. A7.2-4 AISI 2007) $m_d := 0.192 \cdot \left(\frac{F_{ud}}{F_{yd}}\right) - 0.068 = 0.24$

Radio interno de plegado $R := r = 6 \text{ mm}$

Tensión de fluencia a tracción promedio de las esquinas (Eq. A7.2-2 AISI 2007) $F_{yde} := \frac{B_d \cdot F_{yd}}{\left(\frac{R}{e_d}\right)^{m_d}} = 457.72 \text{ MPa}$

Condición CC1 $\frac{F_{ud}}{F_{yde}} \geq 1.2$ CC1 = "FAIL"

Condición CC2 $\frac{R}{e_d} \leq 7$ CC2 = "OK"

¿Aplica incremento de resistencia? INC.RES = "NO"

Tensión de fluencia promedio de la sección total (Eq. A7.2-1 AISI 2007) $F_{yad} := \text{if } INC.RES = \text{"SI"} \left\{ \begin{array}{l} C_d \cdot F_{yd} + (1 - C_d) \cdot F_{yd} \\ \text{else} \\ f_{ys} \end{array} \right.$

$F_{yad} = 250 \text{ MPa}$

7.4. CAPACIDAD RESITENTE

Resistencia nominal a la compresión

¿Perfil cuadrado? Pcua := SI

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0

Factores de longitud efectiva
Tabla C-A-7.1 AISC 360-16

$$K_{xd} := 1.00 \quad \nabla$$

$$K_{yd} := 1.00 \quad \nabla$$

$$K_{td} := 1.00 \quad \nabla$$

Figura 5. Tabla C-A-7.1 AISC 360-16

Longitud no arriostrada del elemento eje fuerte

$$L_{xd} := \frac{L_{cv}}{2} = 2121.32 \text{ mm}$$

Longitud no arriostrada del elemento eje débil

$$L_{yd} := L_{cv} = 4242.64 \text{ mm}$$

Longitud no arriostrada del elemento torsión

$$L_{td} := L_{yd} = 4242.64 \text{ mm}$$

Relación de esbeltez Art. C4c AISI 1997

$$\frac{K_{td} \cdot L_{yd}}{\min(r_{dx}, r_{dy})} \leq 300 \quad \text{Resb} = \text{"OK"}$$

Factor de minoración a la compresión $\phi_{cd} := 0.85$

Esfuerzo de pandeo lateral torsional Ec. C3.1.2-810 AISI 2007

$$\sigma_{etd} := \frac{1}{A_d \cdot r_{0d}^2} \left(G_s \cdot J_d + \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot C_{wd}}{(K_{td} \cdot L_{td})^2} \right) = 187825.03 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo de pandeo lateral sentido fuerte Eq. C3.1.2.1-11 AISI 2007

$$\sigma_{exd} := \frac{\pi^2 \cdot E_s}{\left(K_{xd} \cdot \frac{L_{xd}}{r_{dx}} \right)^2} = 6762.4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Factor de modificación del pandeo flexional Eq. C4.1.2-3 AISI 2007

$$\beta_{cd} := 1 - \left(\frac{x_{0d}}{r_{0d}} \right) = 1.74$$

Tensión de pandeo flexional elástico Eq. C4.1.1-1 AISI 2007

$$F_{ecd1} := \frac{\pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{K_{td} \cdot L_{yd}}{\min(r_{dx}, r_{dy})} \right)^2} = 1690.6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ecd2} := \frac{1}{2 \beta_{cd}} \left((\sigma_{exd} + \sigma_{etd}) - \sqrt{(\sigma_{exd} + \sigma_{etd})^2 - 4 \beta_{cd} \cdot \sigma_{exd} \cdot \sigma_{etd}} \right)$$

$$F_{ecd2} = 6959.84 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{ecd} := \text{if } P_{cua} = \text{"SI"} \left| = 1690.6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right. \\ \left. \begin{array}{l} \parallel F_{ecd1} \\ \text{else} \\ \parallel F_{ecd2} \end{array} \right.$$

Factor de tipo de pandeo

$$\lambda_d := \sqrt[2]{\frac{f_{ys}}{F_{ecd}}} = 1.23$$

Tensión de sección efectiva
Eq. C4.1-(2, 3) AISI 2007

$$F_{nd1} := (0.658^{\lambda_d^2}) \cdot F_{yad} = 1356.18 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{nd2} := \left(\frac{0.877}{\lambda_d^2} \right) \cdot F_{yad} = 1482.66 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{nd} := \text{if } \lambda_d \leq 1.5 \left| = 1356.18 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right. \\ \left. \begin{array}{l} \parallel F_{nd1} \\ \text{else} \\ \parallel F_{nd2} \end{array} \right.$$

Resistencia axial nominal a la compresión
Ec. C4-1 AISI 2007

$$P_{nv} := \phi_{cd} \cdot A_d \cdot F_{nd} = 17231.35 \text{ kgf}$$

Resistencia nominal a la tensión

Factor de minoración a la tensión

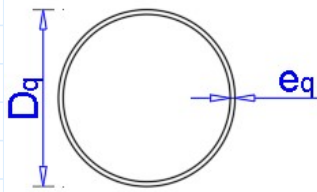
$$\phi_{td} := 0.85$$

Resistencia axial nominal a la tensión
Ec. C2-1 AISI 2007

$$N_{nd} := \phi_{td} \cdot A_d \cdot F_{yad} = 32390.7 \text{ kgf}$$

08 DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE DE SECCIONES CIRCULARES

8.1. PERFILES ESTRUCTURALES



$$D_q := 100 \text{ mm}$$

$$e_q := 4 \text{ mm}$$

Área neta	$A_q = 12.06 \text{ cm}^2$	Modulo elástico X	$S_{qx} = 27.84 \text{ cm}^3$
Peso por ml	$P_{qml} = 9.47 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	Modulo elástico Y	$S_{qy} = 27.84 \text{ cm}^3$
Inercia en Y	$I_{qy} = 139.22 \text{ cm}^4$	Radio de giro X	$r_{qx} = 3.4 \text{ cm}$
Inercia en X	$I_{qx} = 139.22 \text{ cm}^4$	Radio de giro Y	$r_{qy} = 3.4 \text{ cm}$
		Const. Torsionante	$J_q = 278.43 \text{ cm}^4$

8.2. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Limitaciones y consideraciones sobre las dimensiones

Relación entre el ancho plano de las alas y su espesor Art. C.4.1.5 AISI 2007

$$R_{ala} := \frac{D_q}{e_q} \leq 0.441 \cdot \frac{E_s}{f_{ys}} \quad R_{ala} = \text{"OK"}$$

8.3. INCREMENTO DE LA RESISTENCIA DEBIDO AL CONFORMADO EN FRIO

Razón entre el área de las esquinas y el área total de la sección transversal

$$C_q := \frac{A_q}{A_q} = 1$$

Tensión de fluencia del material virgen

$$F_{yq} := f_{ys} = 250 \text{ MPa}$$

Tensión última del material virgen

$$F_{uq} = 400 \text{ MPa}$$

Factor Bv (Eq. A7.2-3 AISI 2007)

$$B_q := 3.69 \cdot \left(\frac{F_{uq}}{F_{yq}} \right) - 0.819 \cdot \left(\frac{F_{uq}}{F_{yq}} \right)^2 - 1.79 = 2.02$$

Factor m (Eq. A7.2-4 AISI 2007)

$$m_q := 0.192 \cdot \left(\frac{F_{uq}}{F_{yq}} \right) - 0.068 = 0.24$$

Radio interno de plegado

$$R_q := D_q = 100 \text{ mm}$$

Tensión de fluencia a tracción promedio de las esquinas
(Eq. A7.2-2 AISI 2007)

$$F_{yeq} := \frac{B_q \cdot F_{yq}}{\left(\frac{R_q}{e_q}\right)^{m_q}} = 233.53 \text{ MPa}$$

Condición CC1

$$\frac{F_{um}}{F_{yeq}} \geq 1.2$$

CC1 = "OK"

Condición CC2

$$\frac{R_q}{e_m} \leq 7$$

CC2 = "FAIL"

¿Aplica incremento de resistencia?

INC.RES = "NO"

Tensión de fluencia promedio de la sección total
(Eq. A7.2-1 AISI 2007)

$$F_{yaq} := \text{if } INC.RES = "SI" \\ \left\| \begin{array}{l} C_q \cdot F_{yeq} + (1 - C_q) \cdot F_{yq} \\ \text{else} \\ f_{ys} \end{array} \right. \\ F_{yaq} = 250 \text{ MPa}$$

8.4. CAPACIDAD RESITENTE

Resistencia nominal a la compresión

¿Perfil cuadrado?

Pcua := NO

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0

Figura 6. Tabla C-A-7.1 AISI 360-16

Factores de longitud efectiva
Tabla C-A-7.1 AISI 360-16

$$K_{xq} := 1.00$$

$$K_{yq} := 1.00$$

$$K_{tq} := 1.00$$

Longitud no arriostrada del elemento eje fuerte

$$L_{xq} := \frac{L_{cv}}{2} = 2121.32 \text{ mm}$$

Longitud no arriostrada del elemento eje débil

$$L_{yq} := L_{xq} = 2121.32 \text{ mm}$$

Longitud no arriostrada del elemento torsión

$$L_{tq} := L_{xq} = 2121.32 \text{ mm}$$

Coeficiente de flexión

$$C_{bv} := 1$$

Relación de esbeltez Art. C4c AISI 1997

$$\frac{K_{tq} \cdot L_{tq}}{\min(r_{qx}, r_{qy})} \leq 300 \quad \text{Resb} = \text{"OK"}$$

Factor de minoración a la compresión

$$\phi_{cq} := 0.85$$

Tensión de pandeo flexional elástico
Eq. C4.1.1-1 AISI 2007

$$F_{eq} := \frac{\pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{K_{tq} \cdot L_{tq}}{\min(r_{qx}, r_{qy})}\right)^2} = 506.2 \text{ MPa}$$

Factor de tipo de pandeo

$$\lambda_q := \sqrt{\frac{f_{ys}}{F_{eq}}} = 0.7$$

Tensión de sección efectiva
Eq. C4.1-(2, 3) AISI 2007

$$F_{nq1} := (0.658^{\lambda_q^2}) \cdot F_{yaq} = 203.31 \text{ MPa}$$

$$F_{nq2} := \left(\frac{0.877}{\lambda_q^2}\right) \cdot F_{yaq} = 443.94 \text{ MPa}$$

$$F_{nq} := \begin{cases} \text{if } \lambda_q \leq 1.5 & = 203.31 \text{ MPa} \\ \parallel F_{nq1} \\ \text{else} \\ \parallel F_{nq2} \end{cases}$$

Área reducida debido al pandeo local
Eq. C4.1.5-2 AISI 2007

$$A_{oq} := \min\left(\left(\frac{0.037}{\frac{D_q \cdot F_{yaq}}{e_q \cdot E_s}} + 0.667\right) \cdot A_q, A_q\right) = 12.06 \text{ cm}^2$$

Coeficiente R
Eq. C4.1.5-3 AISI 2007

$$R_{cq} := \min\left(\frac{F_{yaq}}{2 \cdot F_{eq}}, 1\right) = 0.25$$

Área efectiva
Eq. C4.1.5-1 AISI 2007

$$A_{eq} := A_{oq} + R_{cq} \cdot (A_q - A_{oq}) = 12.06 \text{ cm}^2$$

Resistencia axial nominal a la compresión
Ec. C4-1 AISI 2007

$$P_{nq} := \phi_{cq} \cdot A_{eq} \cdot F_{nq} = 21259.14 \text{ kgf}$$

Resistencia nominal a la tensión

Factor de minoración a la tensión

$$\phi_{tq} := 0.85$$

Resistencia axial nominal a la tensión
Ec. C2-1 AISI 2007

$$N_{nq} := \phi_{tq} \cdot A_q \cdot F_{yaq} = 26140.83 \text{ kgf}$$