



MARZO 2023



AISC 360-22

VIGAS I DE ALAS Y ALMA NO COMPACTAS DOBLEMENTE SIMÉTRICAS

ANGEL MANRIQUE
INGENIERO CIVIL ESPECIALISTA EN
ESTRUCTURAS

STEEL DESIGN 03

INDICE

03

INTRODUCCIÓN

03

OBJETIVO

03

BASES PARA EL DISEÑO

04

CALIDAD DE LOS MATERIALES

04

GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE APOYO

05

CARGAS Y SOLICITACIONES

06

DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE

12

DISEÑO POR CAPACIDAD DE SERVICIO

01 INTRODUCCIÓN

Las vigas compuestas por perfiles I doblemente simétricas cuyos elementos de la sección transversal son esbeltos, es decir, donde la relación ancho espesor no cumple con los mínimos establecidos en la tabla B4.1 de la norma AISC360, la capacidad resistente a flexión está limitada al menor valor entre la fluencia del ala en compresión, el pandeo lateral torsional, pandeo local del alma o del ala en compresión, y la fluencia del ala en tensión.

Para las fallas por fluencia en tensión y en compresión se considera que esta ocurre en el rango elástico de deformaciones, es decir, por presentar elementos esbeltos se restringe la formación de rótulas plásticas por flexión en este tipo de perfiles.

La falla por pandeo lateral torsional produce una desviación del eje longitudinal de la viga fuera de su plano, por flexión respecto a su eje débil, cuando las secciones transversales giran en torsión desplazándose. El ala de la viga en compresión se comporta como una columna que trata de pandear lateralmente al redor del eje transversal dominada por la ecuación de Euler. Debido a que esta zona está unida a través del alma de la viga a una zona que está en tensión y sin problemas de pandeo, la viga además de girar alrededor del eje débil transversal trata de girar alrededor del eje longitudinal induciendo una torsión a la viga.

La falla por pandeo local del alma o del ala en compresión ocurre en el rango elástico de la viga por pandeo local de alguno de los elementos que conforman la viga en la zona de compresión en forma prematura, antes de alcanzar el esfuerzo cedente. Se caracteriza la falla por presentar arrugamiento en zonas del ala o del alma de la viga.

02 OBJETIVO

El presente documento está referido al diseño mediante el método de los estados límites por de capacidad resistente y de servicio, para vigas I de alas y alma no compactas doblemente simétricas.

03 BASES PARA EL DISEÑO

Normas Nacionales

1. NCh427/1 2016. Construcción - Estructuras de acero - Parte 1: Requisitos para el cálculo de estructuras de acero para edificios

Normas Internacionales

1. ANSI/AISC 360-10. Specification for Structural Steel Buildings
2. ASCE/SEI7. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures

Documentos Técnicos

1. STEEL DESIGN GUIDE 9. Torsional Analysis of Structural Steel Members

04 CALIDAD DE LOS MATERIALES

4.1 ACERO ESTRUCTURAL

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

05 GEOMETRÍA Y CONDICIONES DE APOYO

5.1. CONDICIONES DE APOYO

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

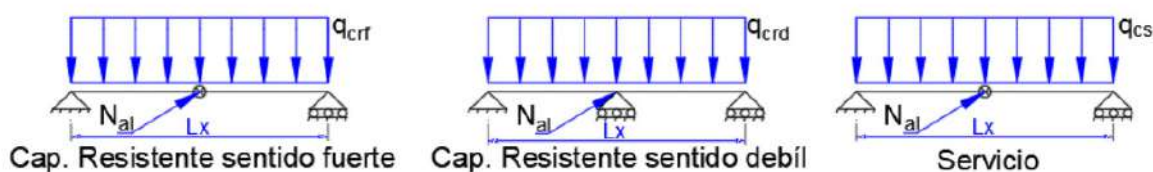


Figura 1. Condiciones de apoyo de viga

Numero de arriostramientos laterales N_{lat}

5.2. GEOMETRÍA Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Tipo de perfil	"Electrosoldado"
Altura total de del perfil	$h_E := 400 \text{ mm}$
Ancho del ala del perfil	$b_{fE} := 200 \text{ mm}$
Espesor del ala del perfil	$t_{fE} := 6 \text{ mm}$
Espesor del alma del perfil	$t_{wE} := 3 \text{ mm}$

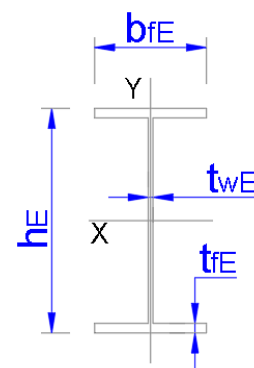


Figura 2. Geometría

Àrea de la sección	$A_E = 35.64 \text{ cm}^2$	Constante Torsional	$J_{iE} = 3.23 \text{ cm}^4$
Peso por ml	$P_{mlE} = 27.98 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$	Constante de alabeo	$C_{wE} = 310505.88 \text{ cm}^6$
Inercia X	$I_{xE} = 10775.16 \text{ cm}^4$		
Inercia Y	$I_{yE} = 800.09 \text{ cm}^4$		
Modulo elástico X	$S_{xE} = 538.76 \text{ cm}^3$		
Modulo elástico Y	$S_{yE} = 80.01 \text{ cm}^3$		

06 CARGAS Y SOLICITACIONES

6.1. CARGAS MAYORADAS

Carga de diseño sentido fuerte (Incluye peso propio)

$$q_{crf} := 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Carga de diseño sentido débil (Incluye peso propio)

$$q_{crd} := 500 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Carga de diseño por deflexión (Incluye peso propio)

$$q_{cs} := 900 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

6.2. SOLICITACIONES

Sentido fuerte

Momento actuante máximo de diseño sentido fuerte

$$M_{acf} := \frac{q_{crf} \cdot L_x^2}{8} = 4500 \text{ kgf m}$$

Cortante actuante máximo de diseño sentido fuerte

$$V_{acf} := q_{crf} \cdot \frac{L_x}{2} = 3000 \text{ kgf}$$

Sentido débil

Momento actuante máximo sentido débil

$$M_{acd} := \frac{q_{crd} \cdot L_x^2}{32} = 562.5 \text{ kgf m}$$

Cortante actuante máximo sentido débil

$$V_{acd} := 0.62 \cdot q_{crd} \cdot L_x = 1860 \text{ kgf}$$

07 DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE

7.1. LIMITACIONES GEOMÉTRICAS

Elementos no atiezos

Relación límite ancho/espesor de alas compactas
Tabla B4.1b AISC360-22

$$\lambda_{pf} := 0.38 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{ys}}} = 10.75$$

Coficiente para elementos esbeltos no rigidizados

$$k_c := \max \left[\min \left[\left[\frac{4}{\sqrt{\frac{h_E - 2 \cdot t_{fE}}{t_{wE}}}} \right] 0.35 \right] 0.76 \right]$$

$$k_c = 0.76$$

Relación límite ancho/espesor de alas esbeltas
Tabla B4.1b AISC360-22

$$\lambda_{rf} := 0.95 \cdot \sqrt{\frac{k_c \cdot E_s}{f_{ys}}} = 23.42$$

Ancho del ala en compresión

$$b_{fcE} := b_{fE} = 200 \text{ mm}$$

Espesor del ala en compresión

$$t_{fcE} := t_{fE} = 6 \text{ mm}$$

Relación ancho/espesor de ala en compresión

$$\lambda_{fE} := \frac{b_{fcE}}{2 \cdot t_{fcE}} = 16.67 \quad \text{"ALA NO COMPACTA"}$$

Elementos atiezos

Relación límite ancho/espesor de almas compactas
Tabla B4.1b AISC360-22

$$\lambda_{pw} := 3.76 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{ys}}} = 106.35$$

Relación límite ancho/espesor de almas esbeltas
Tabla B4.1b AISC360-22

$$\lambda_{rw} := 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{ys}}} = 161.22$$

Relación ancho/espesor del alma
Tabla B4.1b AISC360-22

$$\lambda_{wE} := \frac{h_E - 2 \cdot t_{fE}}{t_{wE}} \quad \text{"ALMA NO COMPACTA"}$$

7.2. CAPACIDAD RESISTENTE SENTIDO FUERTE

Capacidad resistente al momento flector

Factor de minoración al momento flector
Art. F1.a. AISC360-22

$$\phi_b := 0.90$$

Resistencia nominal por fluencia del ala en compresión

Esfuerzo del fluencia

$$f_{ys} = 250 \text{ MPa}$$

Ancho del ala en compresión

$$b_{fcE} := b_{fE} = 200 \text{ mm}$$

Espesor del ala en compresión

$$t_{fcE} := t_{fE} = 6 \text{ mm}$$

Espesor del alma

$$t_{wE} = 3 \text{ mm}$$

Doble de la distancia desde el CG del perfil al interior del ala en compresión

$$h_{cE} := 2 \cdot \left(\frac{h_E}{2} - t_{fE} \right) = 388 \text{ mm}$$

Art. F4.2.6.ii. AISC360-22

Relación de 2 veces el área del alma en compresión y el área del ala en compresión

$$a_{wE} := \min \left(\left[\frac{h_{cE} \cdot t_{wE}}{b_{fcE} \cdot t_{fcE}} \cdot 10 \right] \right) = 0.97$$

Ec. F4-12. AISC360-22

Factor de reducción de la resistencia a la flexión

$$R_{pgE} := 1 - \frac{a_{wE}}{1200 + 300 \cdot a_{wE}} \cdot \left(\frac{h_{cE}}{t_{wE}} + 5.7 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{ys}}} \right)$$

Ec. F5-6. AISC360-22

$$R_{pgE} = 0.81$$

Módulo de sección elástico respecto al ala en compresión

$$S_{xcE} := S_{xE} = 538.76 \text{ cm}^3$$

Momento resistente nominal por fluencia del ala en compresión

$$M_{PE} := \phi_b \cdot R_{pgE} \cdot f_{ys} \cdot S_{xcE} = 10024.5 \text{ kgf m}$$

Ec. F5-1. AISC360-22

Resistencia nominal a momento por pandeo lateral torsional

Longitud de arriostramiento

$$L_b := \frac{L_x}{|N_{lat}| + 1} = 3000 \text{ mm}$$

Art. F2.2. AISC360-22

Radio de giro de los componentes del ala en compresión por flexión más un tercio del área del alma en compresión debido a la aplicación de momento de flexión del eje mayor

$$r_t := \frac{b_{fcE}}{\sqrt{12 \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \cdot a_{wE} \right)}} = 53.57 \text{ mm}$$

Ec. F4-11. AISC360-22

Longitud límite no arriostrada para el estado límite de fluencia

$$L_p := 1.1 \cdot r_t \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_{ys}}} = 1666.62 \text{ mm}$$

Ec. F4-7. AISC360-22

Longitud límite no arriostrada para el estado límite de torsión lateral inelástica

$$L_r := \pi \cdot r_t \cdot \sqrt{\frac{E_s}{0.7 \cdot f_{ys}}} = 5689.11 \text{ mm}$$

Ec. F5-5. AISC360-22

Factor de modificación de pandeo lateral torsional

Momento ubicado a un cuarto del segmento no arriostrado

$$M_A := \frac{3}{4} \cdot \frac{Q_{crf} \cdot L_x^2}{8} = 3375 \text{ kgf m}$$

Momento ubicado en el centro del segmento no arriostrado

$$M_B := \frac{Q_{crf} \cdot L_x^2}{8} = 4500 \text{ kgf m}$$

Momento ubicado tres cuartos del segmento no arriostrado

$$M_C := \frac{3}{4} \cdot \frac{Q_{crf} \cdot L_x^2}{8} = 3375 \text{ kgf m}$$

Factor de modificación de pandeo lateral torsional

$$C_b := \frac{12.5 \cdot M_{acf}}{2.5 \cdot M_{acf} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C} = 1.14$$

Ec. F2-1. AISC360-22

Esfuerzo crítico para es estado limite de fluencia
Ec. F5-3. AISC360-22

$$F_{crP1} := \min \left(\left[C_b \cdot \left(f_{ys} - 0.3 \cdot f_{ys} \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right) f_{ys} \right] \right)$$

$$F_{crP1} = 250 \text{ MPa}$$

Esfuerzo crítico para es estado limite de pandeo lateral torsional
Ec. F5-4. AISC360-22

$$F_{crP2} := \min \left(\left[\frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot E_s}{\left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} f_{ys} \right] \right)$$

$$F_{crP2} = 250 \text{ MPa}$$

Esfuerzo crítico considerado para el diseño
Ec. F5-(3 - 4). AISC360-22

$$F_{crP} := \text{if } (L_b > L_p) \wedge (L_b \leq L_r) \begin{cases} F_{crP1} \\ \text{else} \\ \text{if } L_b > L_r \\ F_{crP2} \\ \text{else} \\ f_{ys} \end{cases}$$

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

Momento resistente nominal por pandeo lateral torsional
Ec. F5-2. AISC360-22

$$M_{n1} := \phi_b \cdot R_{pgE} \cdot F_{crP} \cdot S_{xcE} = 10024.5 \text{ kgf m}$$

Resistencia nominal al pandeo local del ala en compresión

Relación ancho/espesor de ala en compresión $\lambda_{fE} = 16.67$ "ALA NO COMPACTA"

Módulo de sección elástico respecto al ala en compresión $S_{xcE} = 538.76 \text{ cm}^3$

Esfuerzo crítico para alas no compactas
Ec. F5-8. AISC360-22

$$F_{crPLL} := f_{ys} - 0.3 \cdot f_{ys} \cdot \left(\frac{\lambda_{fE} - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) = 214.98 \text{ MPa}$$

Esfuerzo crítico para alas esbeltas
Ec. F5-9. AISC360-22

$$F_{crPL2} := \frac{0.9 \cdot E_s \cdot k_c}{\left(\frac{b_{fcE}}{2 \cdot t_{fcE}} \right)^2} = 492.48 \text{ MPa}$$

+

Esfuerzo crítico considerado para el diseño
Ec. F5-(8 - 9). AISC360-22

$$F_{crPL} = 214.98 \text{ MPa}$$

Momento resistente nominal por pandeo local del ala en compresión
Ec. F5-7. AISC360-22

$$M_{n2} := \phi_b \cdot R_{pgE} \cdot F_{crPL} \cdot S_{xcE} = 8620.4 \text{ kgf m}$$

Momento resistente nominal por fluencia del ala en tensión

Módulo de sección elástico respecto al ala en compresión

$$S_{xcE} = 538.76 \text{ cm}^3$$

Módulo de sección elástico respecto al ala en tensión

$$S_{xtE} := S_{xE} = 538.76 \text{ cm}^3$$

Momento resistente nominal por fluencia del ala en tensión
Ec. F5-10. AISC360-22

$$M_{n3} := \phi_b \cdot f_{ys} \cdot S_{xtE} = 12361.05 \text{ kgf m}$$

Momento resistente nominal sentido fuerte

Momento resistente nominal sentido fuerte

$$M_{nf} := \min \left(\left[M_{PE} \ M_{n1} \ M_{n2} \ M_{n3} \right] \right) = 8620.4 \text{ kgf m}$$

Capacidad resistente al cortante

Resistencia nominal al corte sentido fuerte

Factor de minoración al cortante
Art. G1. AISC360-22

$$\phi_v := 0.9$$

Coefficiente de pandeo por cortante del alma
Art. G2.1b(2)i. AISC360-22

$$k_v := 5.34$$

Constante C_{v1}

$$C_{v1a} := 1$$

$$C_{v1b} := \frac{1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E_s}{f_{ys}}}}{\frac{h_E - 2 \cdot t_{fE}}{t_{wE}}}$$

$$C_{v1} := \text{if } \frac{h_E - 2 \cdot t_{fE}}{t_{wE}} \leq 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E_s}{f_{ys}}}$$

$$C_{v1a}$$

else

$$C_{v1b}$$

$$C_{v1} = 0.56$$

Área del alma
Art. G2.1. AISC360-22

$$A_w := h_E \cdot t_{wE} = 12 \text{ cm}^2$$

Cortante resistente nominal

$$V_{nf} := \phi_v \cdot A_w \cdot C_{v1} \cdot f_{ys} = 15305.27 \text{ kgf}$$

7.3. CAPACIDAD RESITENTE SENTIDO DÉBIL

Capacidad resistente al momento flector

Factor de minoración al momento flector
Art. F1.a. AISC360-22

$$\phi_b = 0.9$$

Resistencia nominal a momento por fluencia

Esfuerzo del fluencia	$f_{ys} = 250 \text{ MPa}$
Módulo Elástico Y	$S_{yE} = 80.01 \text{ cm}^3$
Momento resistente nominal por fluencia Ec. F6-1. AISC360-22	$M_{nd1} := \phi_b \cdot 1.6 \cdot f_{ys} \cdot S_{yE} = 2937.1 \text{ kgf m}$

Resistencia nominal a momento por pandeo local del ala

Relación ancho/espesor de ala en compresión	$\lambda_{fE} = 16.67$	"ALA NO COMPACTA"
Relación límite ancho/espesor de alas compactas Tabla B4.1b AISC360-22	$\lambda_{pf} = 10.75$	
Relación límite ancho/espesor de alas esbeltas Tabla B4.1b AISC360-22	$\lambda_{rf} = 23.42$	
Momento resistente para alas no compactas Ec. F6-2. AISC360-22	$M_{nd2a} := M_{nd1} - \left(M_{nd1} - 0.7 \cdot f_{ys} \cdot S_{yE} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_{fE} - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right)$	
	$M_{nd2a} = 2232.41 \text{ kgf m}$	
Momento resistente para alas esbeltas Ec. F6-3. AISC360-22	$M_{nd2b} := \frac{0.70 \cdot E_s}{2} \cdot S_{yE} = 4111.94 \text{ kgf m}$	

+

Momento resistente a momento por pandeo local del ala Ec. F6-3. AISC360-22	$M_{nd2} = 2232.41 \text{ kgf m}$
-------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------

Momento resistente nominal sentido débil

+

Relación ancho/espesor de ala en compresión	$\lambda_{fE} = 16.67$	"ALA NO COMPACTA"
Momento resistente nominal sentido débil	$M_{nd} = M_{nd1}$	"NO APLICA"
	$M_{nd} = M_{nd2}$	"APLICA"
	$M_{nd} = 2232.41 \text{ kgf m}$	

7.4. RESUMEN DE DISEÑO POR CAPACIDAD RESISTENTE

Diseño a flexión biaxial

Momento actuante máximo de diseño sentido fuerte	$M_{acf} = 4500 \text{ kgf m}$
Momento resistente máximo sentido fuerte	$M_{nf} = 8620.4 \text{ kgf m}$
Momento actuante máximo sentido débil	$M_{acd} = 562.5 \text{ kgf m}$
Momento resistente máximo sentido débil	$M_{nd} = 2232.41 \text{ kgf m}$

Factor de utilización a momento Ec. H1-1b. AISC360-22	77.4 %	$\frac{M_{acf}}{M_{nf}} + \frac{M_{acd}}{M_{nd}} \leq 1$	"OK"
----------------------------------------------------------	--------	----------------------------------------------------------	------

Diseño a corte

Cortante actuante máximo de diseño sentido fuerte		$V_{acf} = 3000 \text{ kgf}$	
Resistencia nominal al corte sentido fuerte		$V_{nf} = 15305.27 \text{ kgf}$	
Factor de utilización a cortante	19.6 %	$\frac{V_{acf}}{V_{nf}} \leq 1$	"OK"

08 DISEÑO POR CAPACIDAD DE SERVICIO

8.1. DISEÑO POR DEFLEXIÓN

La norma NCh427/1 2016 especifica en su disposición L1 que para los estados límites de servicio, las cargas y las combinaciones de carga apropiadas se encuentran en el documento Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI7), Anexo C.

Sentido fuerte

Deformación límite
Anexo C ASCE/SEI7

$$D_{lim} := \frac{L_x}{360} = 16.67 \text{ mm}$$

Deformación máxima de la viga

$$D_{max} := \frac{5 \cdot q_{CS} \cdot L_x^4}{384 \cdot E_s \cdot I_{xE}} = 6.91 \text{ mm}$$

Factor de utilización por deflexión 41.47 %

$$\frac{D_{max}}{D_{lim}} \leq 1 \quad \text{"OK"}$$