

Figura F.7.F-2
Posición del centro de corte (S) y coeficiente de alabeo (H) para algunas secciones de pared delgada

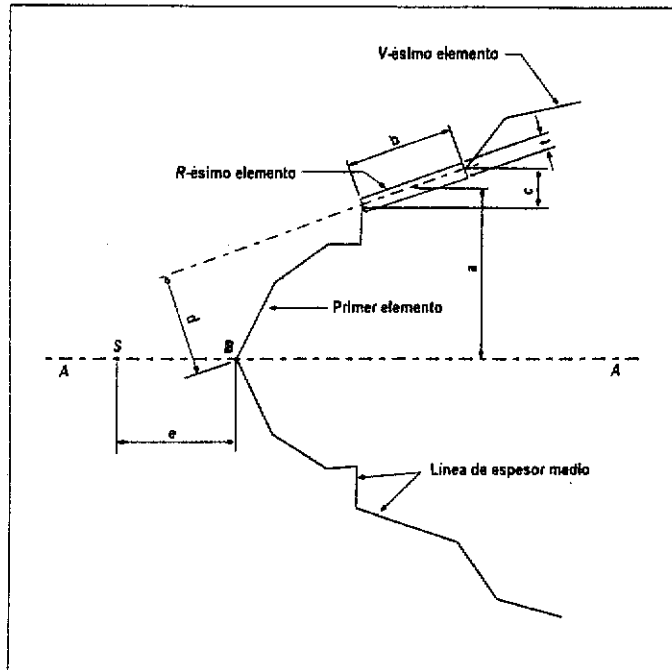


Figura F.7.F-3
Notación de sección monosimétrica

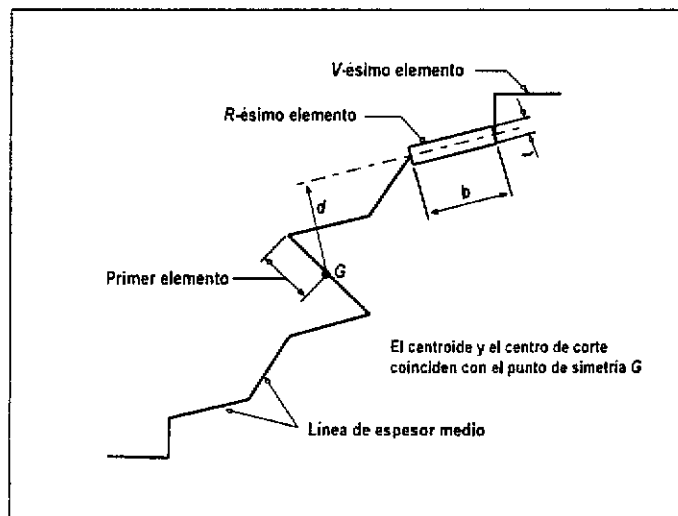


Figura F.7.F-4
Notación de sección con simetría oblicua

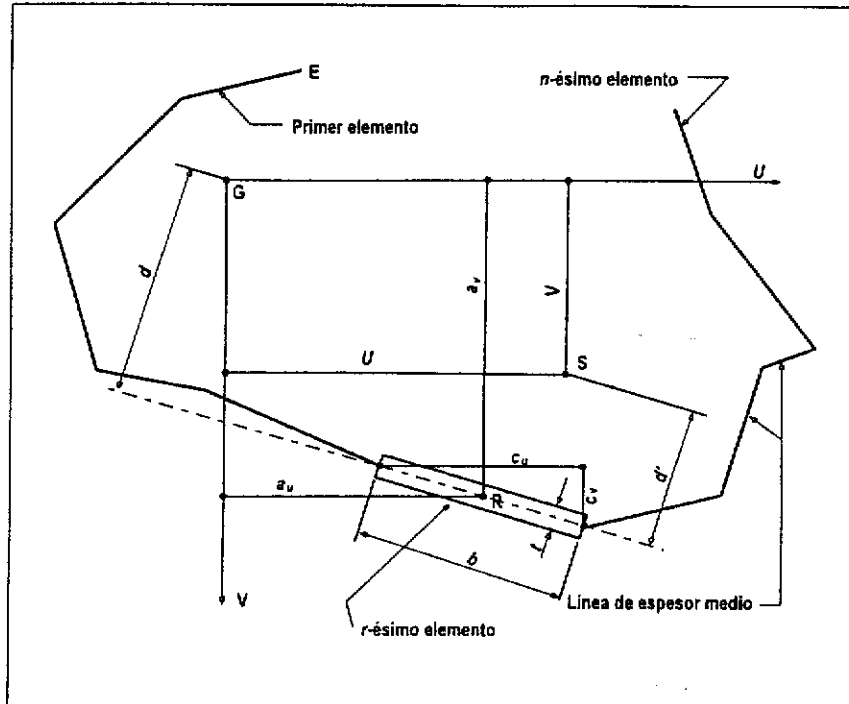


Figura F.7.F-5
Notación de sección asimétrica

APENDICE F.7.G PANDEO TORSIONAL LATERAL DE VIGAS

F.7.G.1 - LONGITUD EFECTIVA DE VIGAS

F.7.G.1.1 - VIGAS SOPORTADAS EN AMBOS EXTREMOS - La longitud efectiva l de una viga, para usar en F.7.4.5.6 (d), debe obtenerse de la tabla F.7.G.1 si la viga tiene restricción lateral efectiva sólo en sus extremos.

Para vigas con restricciones laterales efectivas en intervalos dentro de su longitud, el valor de l debe tomarse como la longitud entre restricciones.

F.7.G.1.2 - CARGAS DESESTABILIZADORAS - Existen condiciones desestabilizadoras de carga cuando una carga es aplicada a la aleta superior de una viga y tanto la carga como la viga tienen la libertad de deflectarse lateralmente con relación al centroide de la viga. En tales casos, se deben usar las longitudes efectivas incrementadas de la tabla F.7.G.1.

Para vigas que soportan cargas desestabilizadoras pero tienen restricción lateral efectiva a intervalos dentro de su longitud, el valor de l debe tomarse como 1.2 veces la longitud entre soportes laterales.

F.7.G.1.3 - VOLADIZOS - La longitud efectiva l para voladizos sin soporte lateral intermedio y sin momento aplicado en la punta, debe obtenerse de la tabla F.7.G.2.

Si se suministran apoyos laterales intermedios, los valores de l para las longitudes entre restricciones deben tomarse de F.7.G.1.1 o F.7.G.1.2.

Para voladizos sometidos a un momento en la punta, l se debe determinar de acuerdo con F.7.G.1.1 o F.7.G.1.2.

F.7.G.2 - DETERMINACION DE λ

El parámetro de esbeltez para pandeo torsional lateral λ , se obtiene de la siguiente expresión (véase F.7.4.5.6 (d)):

$$\lambda = \pi \left(\frac{ES}{M_{cr}} \right)^{1/2}$$

donde

M_{cr} = momento uniforme elástico crítico

E y S = como se definen en F.7.4.5.6 (d)

Para una sección uniforme doble-simétrica, M_{cr} está dado por:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} (EI_y GJ)^{1/2} \left(1 + \pi^2 EH / L^2 GJ \right)^{1/2}$$

donde

I_y = segundo momento del área respecto al menor eje centroidal

G , J y H = como se definen en F.7.1.3

Para una sección uniforme simétrica respecto al eje menor solamente, M_{cr} está dado por:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} (EI_y GJ)^{1/2} \left\{ \left(1 + \frac{\pi^2 \beta_x^2 EI_y}{4l^2 GJ} \right)^{1/2} + \frac{\pi \beta_x}{2l} \left(\frac{EI_y}{GJ} \right)^{1/2} \right\}$$

donde

$$\beta_x = \frac{I}{I_x} \left(\int_0^A x^2 y dA + \int_0^A y^3 dA \right) - 2y_0$$

- I_x = segundo momento del área respecto al mayor eje centroidal
 y_0 = distancia entre el centroide y el centro de corte
 A = área de la sección transversal del voladizo

En ambos casos se puede consultar la literatura disponible para soluciones de M_{cr} relacionadas con arreglos de carga diferentes a momento uniforme. Cuando ésto se tenga en cuenta para determinar λ , el valor de \bar{M} en F.7.4 5 6 (b) debe tomarse como el valor máximo en la viga.

F.7.G.3 - VIGAS QUE VARIAN DE SECCION A LO LARGO DE SU LONGITUD

Cuando la sección doble-simétrica de una viga o voladizo varía a lo largo de su longitud entre puntos de restricción, se debe determinar el esfuerzo de pandeo p_s usando las propiedades de la sección en el punto de momento máx.mo. Luego, este valor de p_s se aplica a toda la longitud entre puntos de restricción y no se deben hacer consideraciones adicionales para el patrón de momentos.

Siempre que R_f no sea menor que 0.2, el valor de λ , basado en la sección transversal en el punto de máximo momento, debe multiplicarse por

$$(1.5 - 0.5 R_f) \quad (\text{pero } \geq 1.0)$$

donde R_f es la relación del área de aleta en el punto de mínimo momento sobre el área de aleta en el punto de máximo momento entre puntos de restricción adyacentes. R_f se refiere o a la relación de área total de ambas aletas o al área de la aleta de compresión únicamente, la que de el menor valor de R_f . Valores de R_f menores de 0.2 representan un grado extremo de disminución en la sección de la aleta que no está cubierto por esta cláusula

Tabla F.7.G-1
Longitud efectiva l para vigas de longitud L

		Normal	Desestabilizadora
Aleta a compresión restringida lateralmente	Ambas aletas totalmente restringidas contra rotación en el plano	$0.7L$	$0.85L$
Viga totalmente restringida contra torsión	Ambas aletas parcialmente restringidas contra rotación en el plano	$0.85L$	$1.0L$
	Ambas aletas libres de rotar en el plano	$1.0L$	$1.2L$
Aleta a compresión no restringida lateralmente	Restricción contra torsión suministrada únicamente por la conexión positiva de la aleta inferior a los apoyos	$1.0L+2D$	$1.2L+2D$
Ambas aletas libres de rotar en el plano	Restricción contra torsión suministrada únicamente por apoyo muerto de la aleta inferior sobre los apoyos	$1.2L+2D$	$1.4L+2D$
NOTA. D es la altura de la viga, L es la longitud de la viga.			

Tabla F.7.G-2
Longitud efectiva l para vigas en voladizo de longitud L

Condiciones de restricción		Condiciones de carga	
En el apoyo	En la punta	Normal	Desestabilizadora
Continuo con restricción lateral únicamente	Libre	3.0L	7.5L
	Lateralmente restringido en la aleta superior únicamente	2.7L	7.5L
	Torsionalmente restringido únicamente	2.4L	4.5L
	Lateral y torsionalmente restringido	2.1L	3.6L
Continuo con restricción lateral y torsional	Libre	1.0L	2.5L
	Lateralmente restringido en la aleta superior únicamente	0.9L	2.5L
	Torsionalmente restringido únicamente	0.8L	1.5L
	Lateral y torsionalmente restringido	0.7L	1.2L
Empotrado lateral y torsionalmente	Libre	0.8L	1.4L
	Lateralmente restringido en la aleta superior únicamente	0.7L	1.4L
	Torsionalmente restringido únicamente	0.6L	0.6L
	Lateral y torsionalmente restringido	0.5L	0.5L

APENDICE F.7.H

PANDEO TORSIONAL DE MIEMBROS A COMPRESION: DETERMINACION DEL PARAMETRO DE ESBELTEZ λ

F.7.H.1 - GENERALIDADES

En el diseño de miembros a compresión, la determinación rigurosa del parámetro de esbeltez λ para pandeo torsional tiende a ser laboriosa. En F.7.4.7.4(b) se da un procedimiento simplificado que usa fórmulas empíricas (véase la tabla F.7.4.9) pero éste cubre sólo un rango limitado de formas de sección. El propósito de este apéndice es presentar un procedimiento general que permita encontrar λ para cualquier sección. Este procedimiento más riguroso puede, por supuesto, ser aplicado a las secciones de la tabla F.7.4.9 si se desea y se obtendrá economía.

El tratamiento involucra el uso de las siguientes propiedades de la sección que pueden encontrarse siguiendo el apéndice F.7.F:

- (a) J constante de torsión
- (b) I_p segundo momento polar del área respecto al centro de corte
- (c) H coeficiente de alabeo

F.7.H.2 - MODOS DE PANDEO

Hay tres modos fundamentales para el pandeo general de un miembro a compresión que se describen a continuación (donde uu y vv son los ejes principales de la sección):

- (a) pandeo como columna puro, es decir flexionante, respecto a vv
- (b) pandeo como columna puro respecto a uu
- (c) pandeo torsional puro

El pandeo torsional puro se define como una rotación general del cuerpo de la sección respecto a su centro de corte en la parte central de la longitud del miembro. En la práctica, este pandeo torsional puro sólo se observa en ciertas formas de sección. En la mayoría de las formas hay interacción entre torsión pura y flexión, y el centro de rotación cae por fuera del centro de cortante. La disminución de resistencia por pandeo torsional debe tenerse en cuenta en el diseño.

El valor requerido para el parámetro de esbeltez λ para tener en cuenta la interacción con la flexión, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = k \lambda_t$$

donde

- k = coeficiente de interacción (véase F.7.H.4)
- λ_t = parámetro de esbeltez correspondiente a pandeo torsional (véase F.7.H.3)

F.7.H.3 - DETERMINACION λ_t

La expresión general para la esbeltez λ_t correspondiente a pandeo torsional puro es la siguiente:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_o}{(1 + 26H / JI^2)^{1/2}}$$

donde

$$\lambda_o = 5.14(I_p / J)^{1/2}$$

I = longitud efectiva de pandeo

Debe notarse que las secciones compuestas de aletas salientes radianes no se alabea cuando se retuercen ($H=0$). Ejemplos de tales formas son ángulos, secciones en T y cruciformes.

F.7.H.4 - DETERMINACION DE k

F.7.H.4.1 - SECCION LIBRE DE INTERACCION CON FLEXION - Los tres tipos de modo de pandeo general (véase F.7.H.2), no interactúan entre sí cuando la sección es de uno de los siguientes tipos (véase la figura F.7.H.1):

- (a) bisimétrica
- (b) con simetría oblicua

Para tales secciones, $k = 1$, o en otras palabras $\lambda = \lambda_t$.

Para calcular λ_t , se debe tomar una I igual a la usada para pandeo como columna respecto del mayor eje principal (véase F.7.4.7.3(b)).

F.7.H.4.2 - SECCIONES MONOSIMETRICAS - Para secciones con un solo eje de simetría (véase la figura F.7.H.2), el modo torsional puro interactúa con el pandeo como columna respecto a ss , entonces:

$$\lambda = k \lambda_t$$

donde

k = se lee en la figura F.7.4.1 tomando s y X como sigue:

$$s = \lambda_s / \lambda_t$$

$$X = I_s / I_p$$

donde

λ_s = parámetro de esbeltez para pandeo como columna puro respecto a ss

λ_t = parámetro de esbeltez para pandeo torsional puro

I_s = segundo momento polar del área respecto al centroide G

I_p = segundo momento polar del área respecto al centro de corte S

La longitud efectiva I a usar para encontrar λ_s y λ_t debe encontrarse de acuerdo con F.7.4.7.3(b), con base en el pandeo como columna respecto a ss .

Para tales secciones, el pandeo como columna respecto al eje perpendicular a ss ocurre independientemente, sin interacción.

F.7.H.4.3 - SECCIONES ASIMETRICAS - Cuando la sección no tiene eje de simetría, como en la figura F.7.H.3, todos los tres modos fundamentales interactúan, conduciendo a una ecuación para λ dada por:

**NSR-98 – Apéndice F.7-H – Pandeo torsional de miembros a compresión:
determinación del parámetro de esbeltez λ**

$$\lambda = \left(\frac{Q}{X^{1/2}} \right) \lambda_t$$

donde

$$Q = s_v \left\{ 3X / (C + s_v^2) \right\}^{1/2}$$

$$X = I_g / I_p$$

$$s_v = \lambda_v / \lambda_t$$

λ_v = parámetro de esbeltez para pandeo como columna puro respecto a vv

λ_t = parámetro de esbeltez para pandeo torsional puro

$$C = \left(1 - u^2 / r_p^2 \right) + \left(1 - v^2 / r_p^2 \right) \gamma$$

r_p = radio polar de giro de la sección respecto al centro de corte S

u y v = coordenadas del centro de corte (véase la figura F.7.H.3)

x = la menor raíz de la siguiente ecuación cúbica:

$$x^3 - 3x^2 + Ax - B = 0$$

donde

$$A = \frac{9X \{ \gamma + s_v^2 (1 + \gamma) \}}{(C + s_v^2)^2}$$

$$B = \frac{27X^2 \gamma s_v^2}{(C + s_v^2)^3}$$

donde

$$\gamma = I_u / I_v$$

I_u e I_v = segundo momento del área respecto de los ejes principales de la sección, uu y vv

La ecuación cúbica puede resolverse con ayuda del nomograma dado en la figura F.7.H.4.

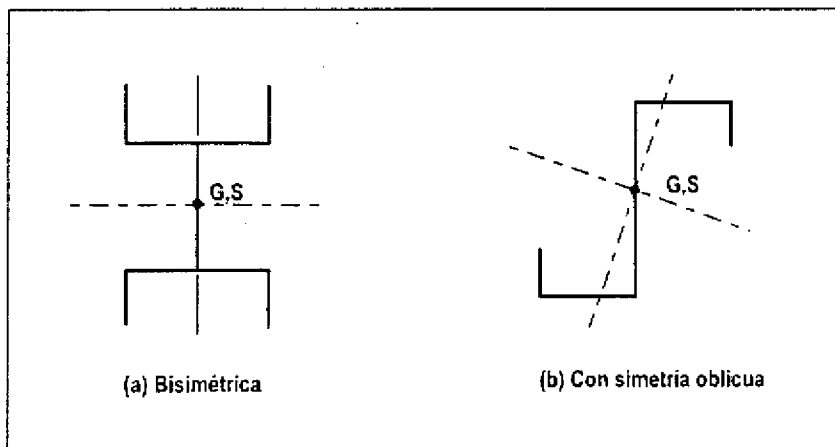


Figura F.7.H-1

Secciones que no muestran interacción entre los modos de pandeo torsional puro y de flexión

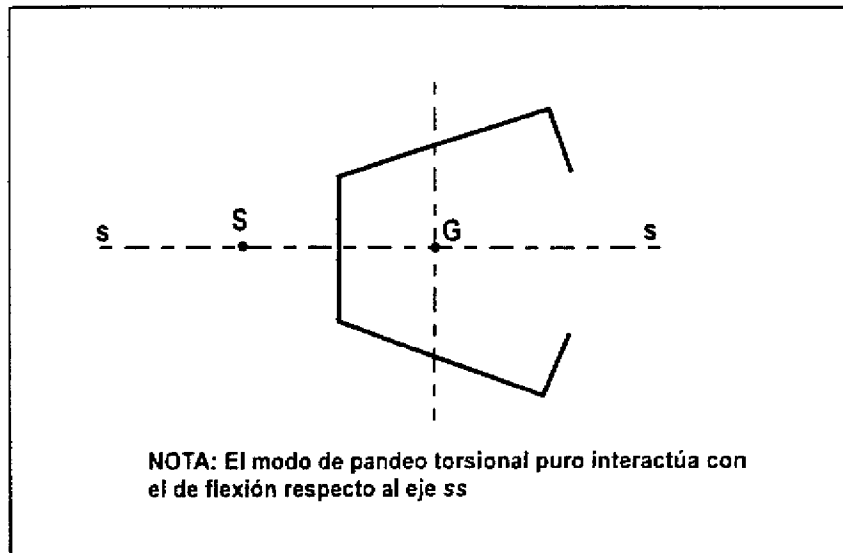


Figura F.7.H-2
Sección monosimétrica

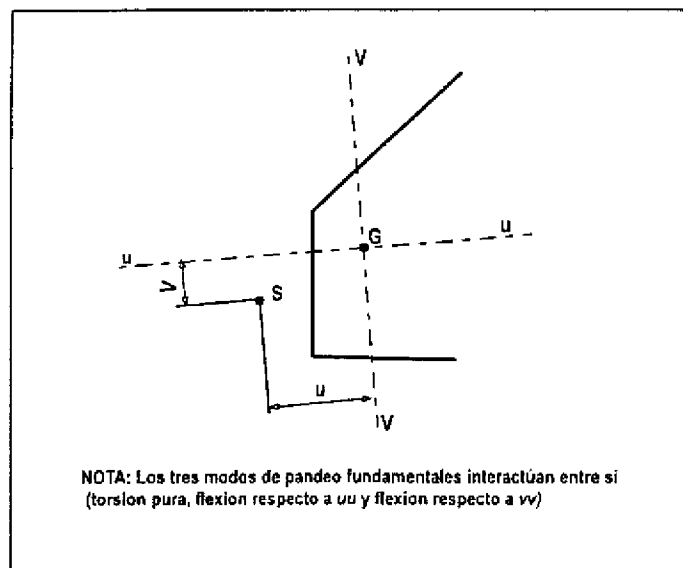
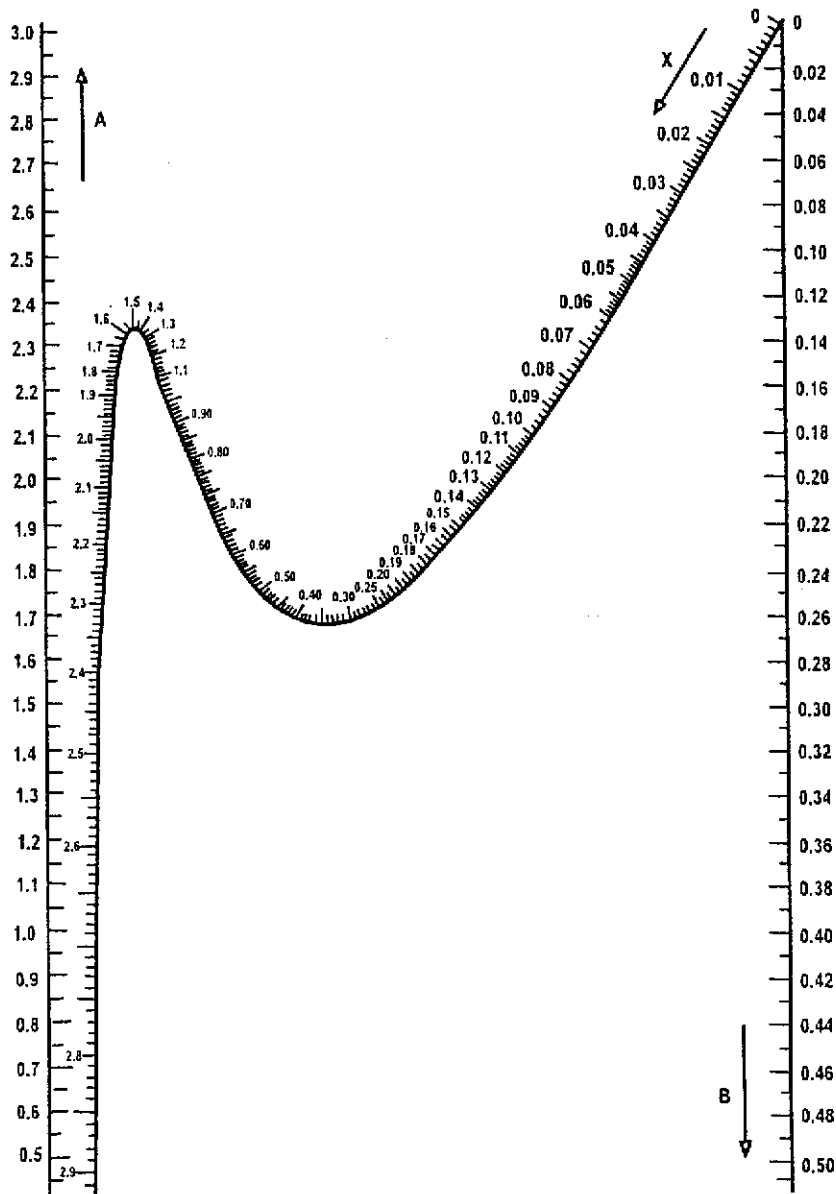


Figura F.7.H-3
Sección asimétrica

**NSR-98 – Apéndice F.7-H – Pandeo torsional de miembros a compresión:
determinación del parámetro de esbeltez λ**



NOTA: La figura se tomó de R. Kappus, "Twisting failure of centrally loaded open section columns in the elastic range", NACA Technical Memorandum No. 851, 1938.

Figura F.7.H-4

Nomograma para resolver la ecuación cúbica $x^3 - 3x^2 + Ax - B = 0$

APENDICE F.7.I ECUACIONES DE CURVAS DE DISEÑO

F.7.I.1 - USO DE FORMULAS

En F.7.4 y F.7.5, donde se hace referencia a curvas de diseño, se permite al diseñador usar en su lugar las fórmulas en las que se basan dichas curvas. Estas están dadas en la tabla F.7.I.1.

F.7.I.2 - PANDEO GENERAL PARA ELEVADA ESBELTEZ

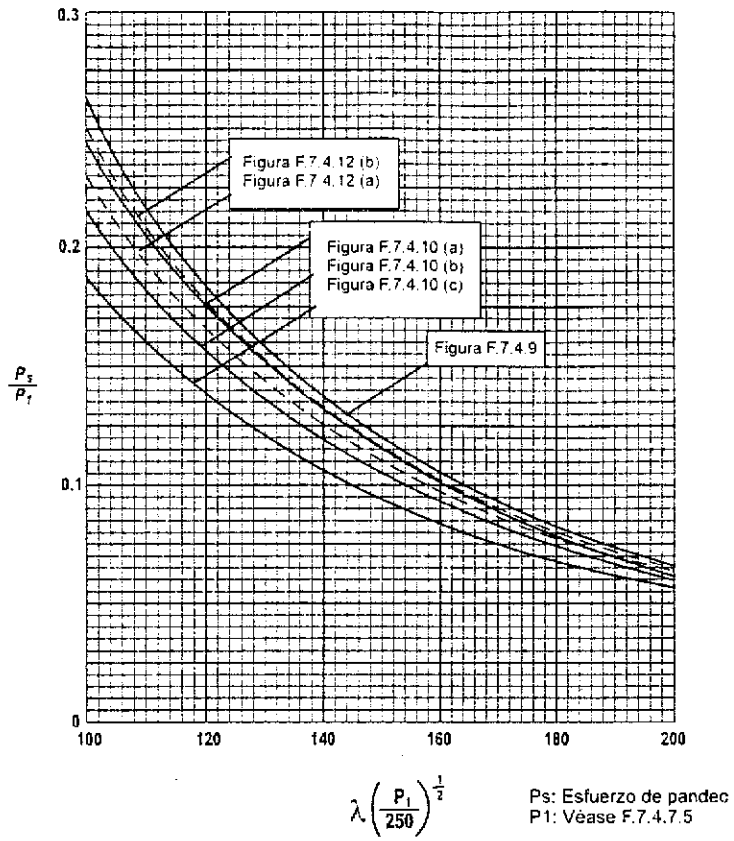
Las curvas de diseño dadas en la sección F.7.4 para pandeo general de vigas y miembros a compresión (véanse las figuras F.7.4.9, F.7.4.10 y F.7.4.12) siempre terminan en una esbeltez dada por $\lambda = 130$. Para valores mayores de λ , el diseñador debe o usar la fórmula apropiada de la tabla F.7.I.1 o consultar la figura F.7.I.1.

Tabla F.7.I-1
Ecuaciones de las curvas de diseño

Figura	Curva	Fórmula	Rango
F.7.4.2	B A	$g = 1$ $g = 0.65 + 0.35 y_o / y_c$ $g = 0.65 + 0.30 y_o / y_c$ $g = 0.7 / (1 - y_o / y_c)$	$1 \geq y_o / y_c \geq 0$ $0 \geq y_o / y_c \geq -1$ $y_o / y_c \leq -1$
F.7.4.4	(a) (b) (c)	$h = \left\{ 1 + 0.1(c/t - 1)^2 \right\}^{-1/2}$ $h = \left\{ 1 + 2.5(c/t - 1)^2 / (b/t) \right\}^{-1/2}$ $h = \left\{ 1 + 4.5(c/t - 1)^2 / (b/t) \right\}^{-1/2}$	$c/t \geq 1$
F.7.4.5	(a) (b)	A $k_L = 11/x - 28/x^2$ $k_L = 105/x^2$ B $k_L = 10/x - 24/x^2$ $k_L = 105/x^2$ C $k_L = 32/x - 220/x^2$ D $k_L = 29/x - 198/x^2$ E $k_L = 1034/x^2$ donde $x = \beta/\epsilon$	$7 < x \leq 12.1$ $x \geq 12.1$ $6 < x \leq 12.9$ $x \geq 12.9$ $x > 22$ $x > 18$
F.7.4.11		$k = \left[\frac{2Ns^2}{1+s^2 - \left\{ (1+s^2) - 4Ns^2 \right\}^{1/2}} \right]^{1/2}$	
		Curvas de pandeo $P_s = N p_1$ donde $N = \phi \left\{ 1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right\}$ $\phi = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{c}{\lambda} + \frac{1 - c\bar{\lambda}_1}{\lambda_2} \right\}$ $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{P_1}{E} \right)^{1/2}$	$\lambda > \bar{\lambda}_1 \left[\pi \left(\frac{E}{P_1} \right)^{1/2} \right]$

Tabla F.7.I-1 (continuación)
Ecuaciones de las curvas de diseño

Figura	Curva	Fórmula		Rango
		0.6	0.10	
F.7.4.9				
F.7.4.10 (a)		0.2	0.20	
(b)		0.2	0.45	
(c)		0.2	0.80	
F.7.4.12 (a)		0.4	0.35	
(b)		0.6	0.20	
		$v_1 = \left\{ 5.35 \left(\frac{d}{a} \right)^2 + 4 \right\} \frac{430}{(d/t_c)^2}$		$1.0 \geq \frac{a}{d} \geq 0.5$
F.7.5.4		$v_1 = \left\{ 5.35 + 4 \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right\} \frac{430}{(d/t_c)^2}$		$2.5 \geq \frac{a}{d} > 1.0$
F.7.5.5		$v_2 = 3^{1/2} Q \text{sen}^2 \theta \left[\cot \theta - \frac{a}{d} \right]$		$2.5 \geq \frac{a}{d} > 1.0$
F.7.5.6		$v_3 = 2 \left(3^{1/2} \right) Q^{1/2} \text{sen} \theta$		$1.0 \geq \frac{a}{d} \geq 0.5$
F.7.5.7		$m_1 = Q^{1/2} \frac{a}{d} \text{sen} \theta$ <p>donde:</p> $Q = \left\{ 1 - v_1^2 \left[1 - \frac{3 \text{sen}^2 2\theta}{4} \right] \right\}^{1/2} - \frac{3^{1/2}}{2} v_1 \text{sen} 2\theta$ $\theta = \frac{2}{3} \tan^{-1} (d/a)$ <p>v_1 como se encuentra en la figura F.7.5.4</p>		
F.7.E.1		$t_c \leq 25$	$t_c > 25$	$\frac{T_0}{T_1} \leq 1/2$
		$\eta = 1.0$ $\eta = 1 + \left(\frac{2T_0}{T_1} - 1 \right) \left(1 - \frac{\sum h}{2h_1} \right)$	$\eta = 1.0$ $\eta = 1 + \left(\frac{2T_0}{T_1} - 1 \right) \left(\frac{2}{3} - \frac{\sum h}{3h_1} \right)$	$1/2 < \frac{T_0}{T_1} \leq 1$
		$\eta = 2 - \frac{\sum h}{2h_1}$	$\eta = \frac{5}{3} - \frac{\sum h}{3h_1}$	$\frac{T_0}{T_1} > 1$



p_s : esfuerzo de pandeo
 p_1 : véase F.7.4.7.5

Figura F.7.I-1
Resistencia al pandeo con alta esbeltez

APENDICE F.7-J DATOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA

F.7.J.1 - DERIVACION DE LOS DATOS $f_r - N$

Las curvas $f_r - N$ de diseño dadas en la figura F.7.7.9 se obtuvieron de datos de ensayos de amplitud constante con resistencias a la fatiga generalmente en la región de 10^5 a $2 \cdot 10^6$ ciclos. La mayoría de los datos fueron obtenidos para especímenes de lámina de 6 mm a 12 mm de espesor. Más recientemente, se ha incluido una base de datos de aproximadamente 120 curvas $f_r - N$ para vigas I extruídas y ensambladas con espesores entre 8 mm y 15 mm. Los materiales cubren las aleaciones de las series 5*** y 6*** más comúnmente usados y la aleación 7020.

Las curvas de diseño representan una probabilidad de supervivencia de por lo menos 97.5% para los detalles clasificados ensayados, cuando todos los datos de ensayo relevantes para cada tipo de detalle se analizan conjuntamente. Típicamente, la curva $f_r - N$ de resistencia media a la fatiga para los datos de cualquier tipo de detalle, es del 30% al 50% más elevada que la curva de diseño.

Las curvas se consideran seguras para cualquier condición de esfuerzo medio hasta el esfuerzo de prueba a tensión. No se recomienda usar relajación para esfuerzos medios inferiores aplicados ya que el esfuerzo local medio real en lugares de iniciación potencial de agrietamiento por fatiga puede ser aún alto aunque el esfuerzo nominal no lo sea. Esto se aplica particularmente a estructuras soldadas y estructuras complejas donde pueden ocurrir encogimiento de la soldadura y desajuste, respectivamente.

La curva nueva producida mediante el cambio de pendiente de la curva de diseño más allá de $5 \cdot 10^6$ ciclos, se ha escogido como el límite inferior para tener en cuenta los daños debidos al rango de esfuerzos altos del espectro. Un rango de alto esfuerzo puede hacer que rangos de esfuerzo por debajo del nivel de esfuerzo de no propagación inicial se sumen a los que causan crecimiento de grietas. En ausencia de datos de ensayos de amplitud variable, la menor pendiente de $m + 2$ ha sido encontrada, mediante procedimientos de mecánica de fracturas, segura para las formas de espectro más comúnmente usadas.

F.7.J.2 - CONDICIONES EN QUE PUEDEN DARSE RESISTENCIAS A LA FATIGA MAS ALTAS

En algunos diseños en que la fatiga domina y en los que el logro de la masa mínima o el costo inicial mínimo es de particular importancia económica, puede haber necesidad de recurrir a la opción de obtener datos específicos para la fatiga (véase F.7.8.4.4). Para tomar la decisión de obtener o no datos adicionales mediante ensayos se deben considerar los siguientes factores.

(a) Pueden haber beneficios cuando los esfuerzos residuales se mantienen bajos o a compresión y en la dirección de la fluctuación de esfuerzos, esto se logra con una secuencia de fabricación cuidadosamente controlada (particularmente la soldadura) o mediante una técnica mecánica de mejoramiento adecuada (por ejemplo, expansión de agujeros o martillado de la intersección de la soldadura con el metal de base). Los principales beneficios se obtienen cuando el daño se origina principalmente a partir de rangos de esfuerzos de resistencia a la fatiga altos en el espectro (véase la figura F.7.J.1).

(b) Se tienen resistencias a la fatiga más altas cuando la escala del componente es pequeña. Esto puede aplicarse cuando los espesores y tamaños de soldadura son menores de 6 mm.

(c) Si hay un gradiente de esfuerzos con una reducción rápida de esfuerzos al alejarse del sitio de iniciación, se pueden tener resistencias a la fatiga mayores, por ejemplo en un accesorio soldado transversalmente o en una lámina a flexión.

(d) Si la forma del espectro es bastante plana, con un gran número de ciclos en o por debajo del nivel de esfuerzo no propagante de amplitud constante, la pendiente efectiva más allá de $5 \cdot 10^6$ ciclos puede ser significativamente más plana (véase la figura F.7.J.1).

Si se recurre a los ensayos y se obtiene una resistencia más alta, es importante que las condiciones de fabricación no se varíen de ningún modo durante la producción. Esto se aplica a la geometría del detalle, secuencia (incluyendo prensado y soldadura), calidad de soldadura, preparación de la superficie (incluyendo maquinado, taladrado de agujeros y limpieza)

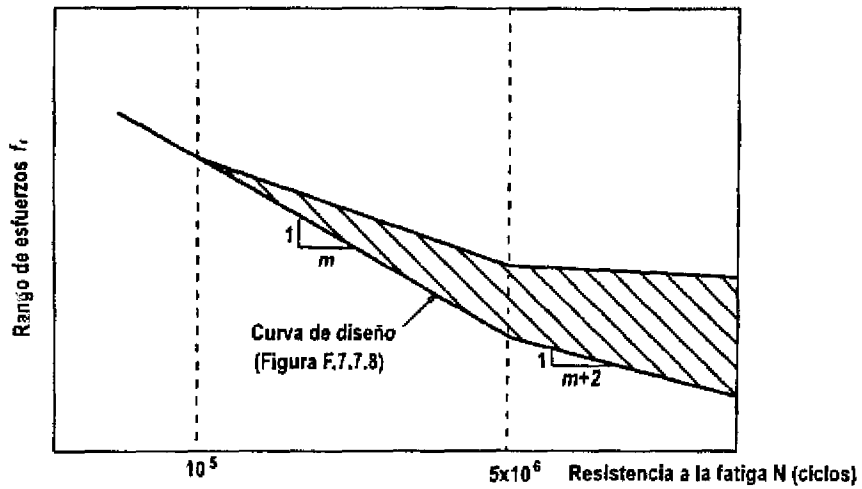


Figura F.7.J-1
Zona de la mayor variación en las curvas efectivas f_e -N