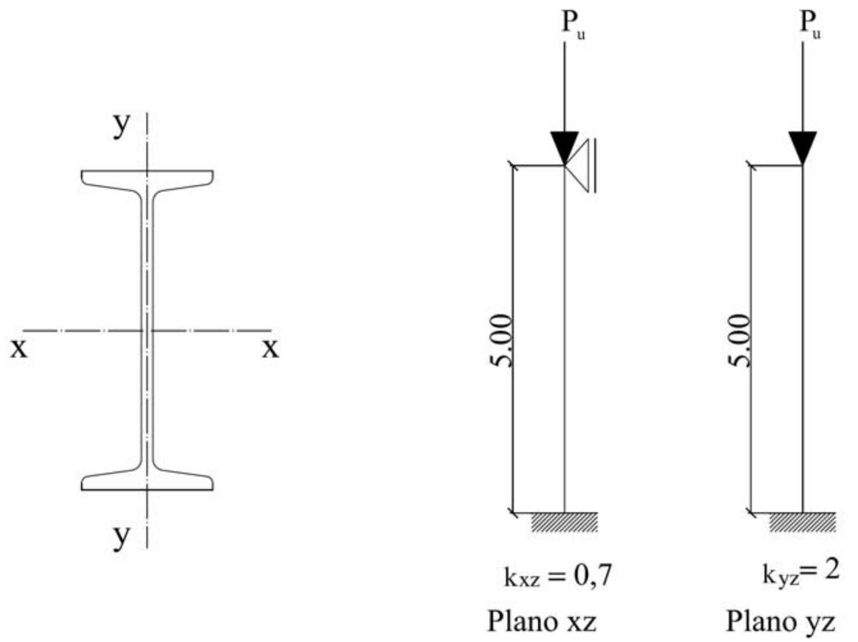
11. Ejemplos de aplicación

Ejemplo 1: Determinar la carga ultima de compresión, mediante el reglamento CIRSOC 301/05, de una columna formada por un IPN 380, cuya longitud es de 5m, la cual tiene las siguientes condiciones de vínculos que se muestran a continuación:



El acero utilizado en los perfiles es acero F-24.

Resolución:

Las características geométricas y mecánicas del perfil IPN 380 son:

$A_g = 107cm^2$
$r_x = 14,98cm$
$r_y = 3,02cm$

Verificamos a continuación la esbeltez local de los elementos del perfil IPN

Se calculan las relaciones ancho-espesor del ala para determinar el tipo de sección:

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{74,5mm}{20,5mm} = 3,63 \text{ (Esbeltez del ala comprimida- Elemento no rigidizado)}$$

De acuerdo a la Tabla B.5-1, para el caso 1

$$\lambda_r = 0,83\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,83\sqrt{\frac{200000MPa}{235MPa}} = 23,47$$

Como $\lambda < \lambda_r$ la sección no es esbelta, por lo tanto el coeficiente $Q = 1$

Se calculan las relaciones ancho-espesor del alma para determinar el tipo de sección:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{306mm}{13,7mm} = 22,33 \text{ (Esbeltez del alma comprimida- Elemento rigidizado)}$$

De acuerdo a la Tabla B.5-1, para el caso 12

$$\lambda_r = 1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49\sqrt{\frac{200000MPa}{235MPa}} = 43,46$$

Como $\lambda < \lambda_r$ la sección no es esbelta, por lo tanto el coeficiente $Q = 1$

Calculamos la esbeltez y la esbeltez reducida en cada plano para determinar la carga última

Plano XZ

$$\lambda_{XZ} = \frac{k_{XZ} \cdot L}{r_y} = \frac{0,7 \cdot 500cm}{3,02cm} = 115,89 < 200 \text{ (Verifica)}$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{0,7 \cdot 500cm}{3,02cm} \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 1,26 < 1,5$$

$$F_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0,658^{1,26^2}\right) \cdot 235MPa = 120,91MPa$$

$$P_u = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_g \cdot \left(10^{-1}\right) = 0,85 \cdot 120,91MPa \cdot 107cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 1099kN$$

Plano YZ

$$\lambda_{YZ} = \frac{k_{YZ} \cdot L}{r_y} = \frac{2 \cdot 500cm}{14,98cm} = 66,75 < 200 \text{ (Verifica)}$$

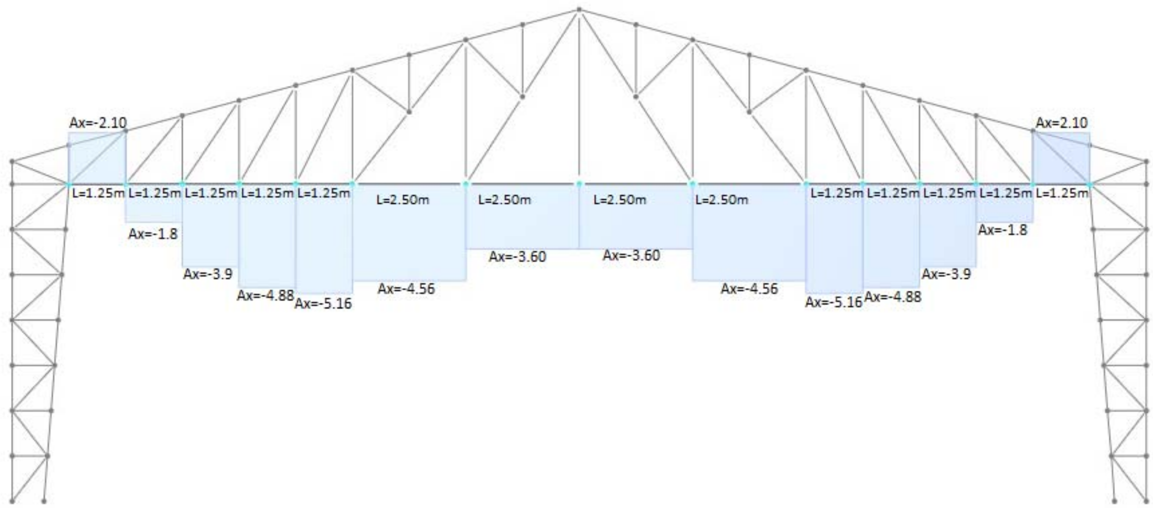
$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot 500cm}{14,98cm} \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 0,728 < 1,5$$

$$F_{cr} = \left(0,658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0,658^{0,728^2}\right) \cdot 235MPa = 188,25MPa$$

$$P_u = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_g \cdot \left(10^{-1}\right) = 0,85 \cdot 188,25MPa \cdot 107cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 1712kN$$

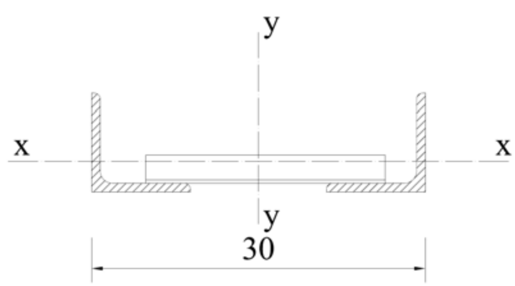
Se adopta el menor de los dos valores, por lo tanto la carga última será $P_u = 1099kN$

Ejemplo 2: Verificar el cordón inferior comprimido de una cabriada bajo el estado de carga de peso propio + viento frontal. El cordón inferior está formado por 2 perfiles ángulo de 2L 3 1/2" x 5/16", unido con diagonales. Las dimensiones y los esfuerzos se indican a continuación. El acero utilizado es F-24



Las dimensiones de la sección compuesta del cordón inferior son:

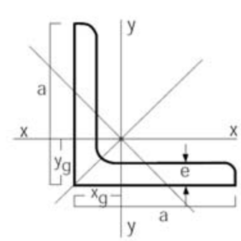
$$2L3\,\tfrac{1}{2}"\ \text{x}\ \tfrac{5}{16}"$$



Resolución:

Las características geométricas y mecánicas del perfil ángulo $2"x1/4"$ son:

$$A = 13{,}57cm^2$$
$$I_x = I_y = 99{,}66cm^4$$
$$r_x = r_y = 2{,}71cm$$
$$r_{\min} = 1{,}69cm$$
$$e_x = e_y = 2{,}47cm$$



Verificación alrededor del eje X-X (Plano YZ - Eje Material)

Se verificara la barra mas comprimida y la barra de mayor longitud

$L = 125cm$
$P_u = 5{,}16kN$

La esbeltez alrededor del eje x-x resulta:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1 \cdot 125cm}{2{,}71cm} = 46 < 200 \text{ (Verifica)}$$

Se calculan las relaciones ancho-espesor del ala para determinar el tipo de sección:

$$\lambda_f = \frac{b}{t} = \frac{88{,}9mm}{7{,}9mm} = 11{,}25 \text{ (Esbeltez del ala)}$$

De acuerdo a la Tabla B.5-1, para el caso 6

$$\lambda_r = 0{,}45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0{,}45\sqrt{\frac{200000MPa}{235MPa}} = 13{,}12$$

Como $\lambda_f < \lambda_r$ la sección no es esbelta, por lo tanto el coeficiente $Q = 1$

Se determina el factor de esbeltez adimensional λ_c

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot 46 \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 0{,}50 < 1{,}5$$

Como $\lambda_c < 1{,}5$ la tensión crítica se determina por:

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}50^2}\right) \cdot 235MPa = 211MPa$$

La resistencia de diseño es:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \cdot \left(10^{-1}\right) = 211MPa \cdot 13{,}57cm^2 \cdot 2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 572kN$$

$$R_d = \phi_c \cdot P_n = 0{,}85 \cdot 572kN = 486kN > 5{,}16kN \text{ (Verifica)}$$

$L = 250cm$
$P_u = 4{,}56kN$

La esbeltez alrededor del eje x-x resulta:

$$\lambda_x = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1 \cdot 250cm}{2{,}71cm} = 92{,}25 < 200 \text{ (Verifica)}$$

Se determina el factor de esbeltez adimensional λ_c

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot 92{,}25 \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 1 < 1{,}5$$

Como $\lambda_c < 1{,}5$ la tensión crítica se determina por:

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{1^2}\right) \cdot 235MPa = 154{,}6MPa$$

La resistencia de diseño es:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \cdot \left(10^{-1}\right) = 154{,}6MPa \cdot 13{,}57cm^2 \cdot 2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 419kN$$

$$R_d = \phi_c \cdot P_n = 0{,}85 \cdot 419kN = 356kN > 4{,}56kN \text{ (Verifica)}$$

Verificación alrededor del eje Y-Y (Plano XZ - Eje Libre)

Se verifica el pandeo fuera del plano y al no haber ninguna restricción lateral, la longitud de pandeo es la suma de las longitudes de las barras comprimidas, por lo tanto $L = 20m = 2000cm$

La compresión máxima es $P_1 = -5{,}16kN$ y la compresión mínima es $P_2 = -1{,}8kN$

$$k_y = 0{,}75 + 0{,}25 \cdot \frac{1{,}8}{5{,}16} = 0{,}837$$

$$L_{py} = k_y \cdot L_y = 0{,}837 \cdot (2000cm) = 1674cm$$

El momento de inercia con respecto al eje libre será:

$$I_y = 2 \cdot \left[99{,}66cm^4 + 13{,}57cm^2 \cdot (15cm - 2{,}47cm)^2\right] = 4460cm^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{4460cm^4}{2 \cdot 13{,}57cm^2}} = 12{,}81cm$$

De acuerdo a la sección A-E.4.2.1.(a) del CIRSOC 301/05 la esbeltez modificada es:

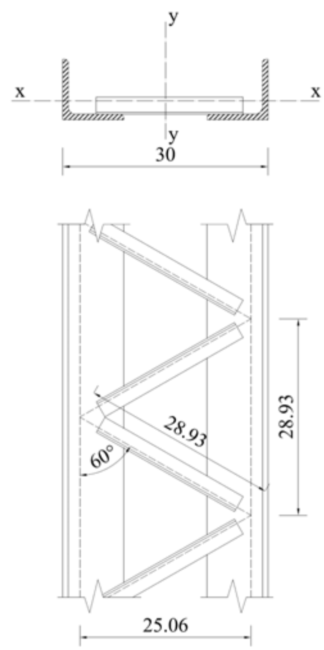
$$\lambda_m = \left(\frac{k \cdot L}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{k \cdot L}{r}\right)_0^2 + (\lambda_1)^2}$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A_g \cdot d^3}{n_0 \cdot A_d \cdot a \cdot h^2}}$$

El perfil que utilizaremos como diagonal será un ángulo de $1"x1/8"$, donde la sección del mismo es de $A_d = 1{,}51 cm^2$

Adoptamos un ángulo de inclinación de las diagonales $\alpha = 60°$, por lo tanto el paso a será:

$$a = \frac{2 \cdot h}{tg\alpha} = \frac{2 \cdot 25{,}06cm}{tg60°} = 28{,}93cm$$



La longitud de la diagonal es $d = \dfrac{h}{sen\alpha} = \dfrac{25{,}06cm}{sen60°} = 28{,}93cm$

Entonces la esbeltez λ_1 es:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 13{,}57cm^2 \cdot (28{,}83cm)^3}{1 \cdot 1{,}51cm^2 \cdot 28{,}93cm \cdot (25{,}06cm)^2}} = 21{,}63$$

Entonces la esbeltez modificada será:

$$\lambda_m = \sqrt{\left(\frac{0{,}837 \cdot 2000cm}{12{,}81cm}\right)^2 + (21{,}63)^2} \cong 132{,}45$$

Para determinar la resistencia de diseño se aplica la metodología del apéndice A-E.4.2.2.
Cada barra de la pieza armada tendrá un esfuerzo requerido igual a:

$$P_{u1} = \frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot (10^2)$$

Siendo:
$P_u = 5{,}16kN$ (Carga Axil)
$h = 30cm - 2 \cdot 2{,}47cm = 25{,}06cm$ (Distancia entre centros de gravedad)
$n = 2$ (Número de barras de la columna armada)
$n_1 = 1$ (Número de barras del cordón)

$$M_s = \frac{P_u \cdot e_0}{1 - \dfrac{P_u}{P_{cm}}} \cdot \left(10^{-2}\right)$$

$$e_0 = \frac{k \cdot L}{500} = \frac{0{,}837 \cdot 2000cm}{500} = 3{,}35cm \text{ (Deformación inicial)}$$

$$P_{cm} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_g}{\lambda_m^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = \frac{\pi^2 \cdot 200000MPa \cdot 13{,}57cm^2 \cdot 2}{132{,}5^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = 305kN$$

$$M_s = \frac{5{,}16kN \cdot 3{,}35cm}{1 - \dfrac{5{,}16kN}{305kN}} \cdot \left(10^{-2}\right) = 0{,}176kNm$$

Entonces las resistencias requeridas resultan para cada ángulo:

$$P_{u1} = \frac{5{,}16kN}{2} + \frac{0{,}176kNm}{1 \cdot 25{,}06cm} \cdot \left(10^{2}\right) \cong 3{,}28kN$$

La resistencia de diseño local a compresión de la barra es igual $P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right)$

$$\lambda_{c1} = \left(\frac{L_1}{r_i}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \left(\frac{28{,}93cm}{1{,}69cm}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 0{,}186 < 1{,}5$$

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda^2{}_c}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}186^2}\right) \cdot 235MPa = 231MPa$$

$$P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right) = 0{,}85 \cdot 231MPa \cdot 13{,}57cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 267kN > P_{u1} \quad \text{(Verifica)}$$

Verificación de las diagonales

De acuerdo a las Secciones A-E.4.2.1(b) y A-E.6, se verifican las diagonales con una fuerza V_{eu} igual a:

$$V_{eu} = \beta_1 . P_u$$

$$\beta_1 = \frac{\pi}{500} \cdot \left[\frac{1}{1 - \dfrac{P_u}{P_{cm}}}\right] = \frac{\pi}{500} \cdot \left[\frac{1}{1 - \dfrac{5{,}16kN}{305kN}}\right] = 0{,}00634$$

$$V_{eu} = \beta_1 . P_u = 0{,}00634 \cdot 5{,}16kN = 0{,}0327kN$$

El esfuerzo que solicita a la diagonal es:

$$D_u = \frac{V_{eu}}{2 \cdot \cos\alpha} = \frac{0{,}0327kN}{2 \cdot \cos 60°} = 0{,}0327kN$$

Se calcula la resistencia de diseño del perfil ángulo
La longitud de la diagonal es $d = 28{,}93cm$

Se determina el factor de esbeltez adimensional λ_c

$$\lambda_d = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1 \cdot 28{,}93cm}{0{,}48cn} \cdot \sqrt{\frac{235}{200000}} = 0{,}657$$

Como $\lambda_c < 1{,}5$ la tensión crítica se determina por:

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}657^2}\right) \cdot 235MPa = 196MPa$$

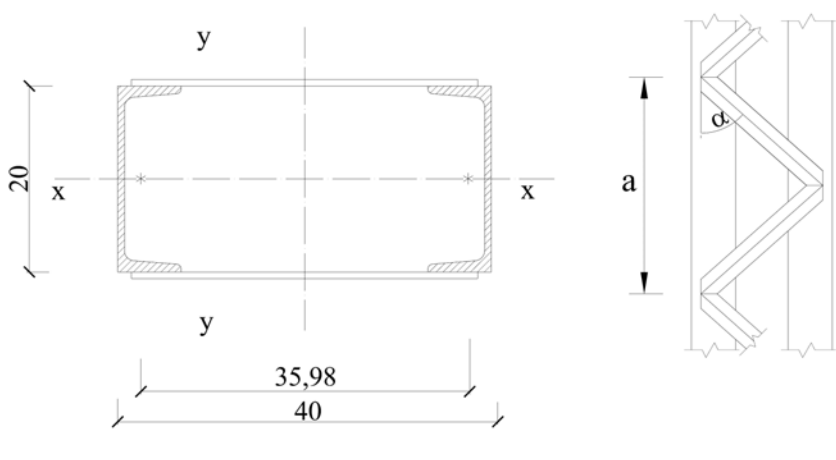
La resistencia de diseño es:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \cdot \left(10^{-1}\right) = 196MPa \cdot 1{,}51cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 29{,}59kN$$

$$R_d = \phi_c \cdot P_n = 0{,}85 \cdot 29{,}59kN = 25{,}15kN > 0{,}0327kN \text{ (Verifica)}$$

Ejemplo 2: Determinar la carga ultima de compresión de una columna formada por dos perfiles UPN 200, el cual sus enlaces son diagonales, y su longitud es de 5m. Las condiciones de vínculos son:
Plano XZ como empotrado - libre ($k_{xz} = 2$),
Plano YZ tipo empotrado - articulado ($k_{yz} = 0{,}7$).

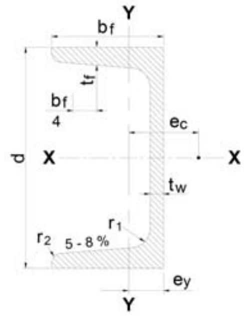
Las dimensiones son las siguientes:



Resolución:

Las características geométricas y mecánicas del perfil UPN 200 son:

$$A_g = 32{,}20 cm^2$$
$$I_x = 1910 cm^4$$
$$I_y = 148 cm^4$$
$$r_x = 7{,}70 cm$$
$$r_y = 2{,}14 cm$$
$$e_y = 2{,}01 cm$$



Determinaremos a continuación las cargas últimas en ambos planos y adoptamos la menor como carga ultima

Verificación alrededor del eje X-X (Plano YZ - Eje Material)

$L_x = 500 cm$

La esbeltez alrededor del eje x-x resulta:

$$\lambda_{YZ} = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0{,}7 \cdot 500 cm}{7{,}70 cm} = 45{,}45 < 200 \text{ (Verifica)}$$

Se determina el factor de esbeltez adimensional λ_c

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot 45{,}45 \cdot \sqrt{\frac{235 MPa}{200000 MPa}} = 0{,}49 < 1{,}5$$

Como $\lambda_c < 1{,}5$ la tensión crítica se determina por:

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda^2{}_c}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}49^2}\right) \cdot 235 MPa = 212{,}5 MPa$$

La resistencia de diseño es:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_{gT} \cdot \left(10^{-1}\right) = 212{,}5 MPa \cdot 2 \cdot 32{,}2 cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 1368 kN$$

$$P_d = \phi_c \cdot P_n = 0{,}85 \cdot 1368 kN = 1163 kN \text{ (Verifica)}$$

Verificación alrededor del eje Y-Y (Plano XZ - Eje Libre)

El momento de inercia con respecto al eje libre será:

$$I_y = 2 \cdot \left[148cm^4 + 32,20cm^2 \cdot (35,98cm/2)^2\right] = 21138cm^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{21138cm^4}{2 \cdot 32,20cm^2}} = 18,11cm^4$$

De acuerdo a la sección A-E.4.2.1.(a) del CIRSOC 301/05 la esbeltez modificada es:

$$\lambda_m = \left(\frac{k \cdot L}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{k \cdot L}{r}\right)_0^2 + (\lambda_1)^2}$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot A_g \cdot d^3}{n_0 \cdot A_d \cdot a \cdot h^2}}$$

El perfil que utilizaremos como diagonal será un ángulo de $2"x1/8"$, donde la sección del mismo es de $A_d = 3,21cm^2$

Adoptamos un ángulo de inclinación de las diagonales $\alpha = 60°$, por lo tanto el paso a será:

$$a = \frac{2 \cdot h}{tg\alpha} = \frac{2 \cdot 35,98cm}{tg60°} = 41,54cm$$

La longitud de la diagonal es $d = \dfrac{h}{sen\alpha} = \dfrac{35,98cm}{sen60°} = 41,54cm$

Entonces la esbeltez λ_1 es:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 32,20cm^2 \cdot (41,53cm)^3}{1 \cdot 3,21cm^2 \cdot 41,54cm \cdot (35,98cm)^2}} = 22,96$$

Entonces la esbeltez modificada será:

$$\lambda_m = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 500cm}{18,11cm}\right)^2 + (22,96)^2} \cong 60$$

Para determinar la resistencia de diseño se aplica la metodología del apéndice A-E.4.2.2.
Cada barra de la pieza armada tendrá un esfuerzo requerido igual a:

$$P_{u1} = \frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot \left(10^2\right)$$

Como no se puede despejar en forma directa P_u, la obtendremos por tanteo, es decir le daremos un valor a P_u, y de ahí verificaremos que se cumpla la igualdad de la ecuación anterior.

Primeramente, procedemos a calcular P_{u1}, lo cual lo haremos igualando al valor de P_{d1}

La resistencia de diseño local a compresión de la barra es igual $P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right)$

$$\lambda_{c1} = \left(\frac{L_1}{r_i}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \left(\frac{41{,}54cm}{2{,}14cm}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 0{,}21 < 1{,}5$$

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda^2{}_c}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}21^2}\right) \cdot 235MPa = 230{,}6MPa$$

$$P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right) = 0{,}85 \cdot 230{,}6MPa \cdot 32{,}20cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 631kN$$

$$P_{u1} = P_{d1} = 631kN$$

Realizamos el primer tanteo y verificamos si se cumple la igualdad

$P_u = 1200kN$

$$P_{cm} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_g}{\lambda_m^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = \frac{\pi^2 \cdot 200000MPa \cdot 32{,}2cm^2 \cdot 2}{60^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = 3531kN$$

$$e_0 = \frac{k \cdot L}{500} = \frac{2 \cdot 500cm}{500} = 2cm \text{ (Deformación inicial)}$$

$$M_s = \frac{P_u \cdot e_0}{1 - \dfrac{P_u}{P_{cm}}} \cdot \left(10^{-2}\right) = \frac{1200kN \cdot 2cm}{1 - \dfrac{1200kN}{3531kN}} \cdot \left(10^{-2}\right) = 36{,}35kNm$$

$$\frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot \left(10^2\right) = \frac{1200kN}{2} + \frac{36{,}35kNm}{1 \cdot 35{,}98cm} \cdot \left(10^2\right) = 701kN \neq 631kN$$

Como se ve no cumple la igualdad, por lo tanto la carga ultima es menor. Realizaremos un nuevo tanteo

$P_u = 1150kN$

$$M_s = \frac{P_u \cdot e_0}{1 - \frac{P_u}{P_{cm}}} \cdot \left(10^{-2}\right) = \frac{1150kN \cdot 2cm}{1 - \frac{1150kN}{3531kN}} \cdot \left(10^{-2}\right) = 34{,}1kNm$$

$$\frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot \left(10^{2}\right) = \frac{1150kN}{2} + \frac{34{,}10kNm}{1 \cdot 35{,}98cm} \cdot \left(10^{2}\right) = 669kN \neq 631kN$$

Como se ve no cumple la igualdad, por lo tanto la carga ultima es menor. Realizaremos un nuevo tanteo

$P_u = 1088kN$

$$M_s = \frac{P_u \cdot e_0}{1 - \frac{P_u}{P_{cm}}} \cdot \left(10^{-2}\right) = \frac{1088kN \cdot 2cm}{1 - \frac{1088kN}{3531kN}} \cdot \left(10^{-2}\right) = 31{,}45kNm$$

$$\frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot \left(10^{2}\right) = \frac{1088kN}{2} + \frac{31{,}45kNm}{1 \cdot 35{,}98cm} \cdot \left(10^{2}\right) = 631{,}48kN \cong 631kN$$

Como se ve, los valores son similares, por lo tanto podemos determinar que la carga última en este plano es $P_u = 1088kN$. Al ser menor que la del plano XZ, esta será la resistencia última de la columna

Ejemplo 4: Verificar la columna del ejercicio anterior a flexocompresion en el plano XZ, donde la carga ultima de compresión es de $P_u = 500kN$ y el momento $M_u = 100kNm$ $\left(\beta_{xz} = 2\right)$

Resolución:

El cálculo de la esbeltez es de la misma manera que en el ejercicio anterior, por lo que solo cambia es la ecuación de M_s

$$M_s = \frac{P_u \cdot e_0 + M_u}{1 - \frac{P_u}{P_{cm}}}$$

$$e_0 = \frac{k \cdot L}{500} = \frac{2 \cdot 500cm}{500} = 2cm \text{ (Deformación inicial)}$$

$$P_{cm} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A_g}{\lambda_m^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = \frac{\pi^2 \cdot 200000MPa \cdot 32{,}2cm^2 \cdot 2}{60^2} \cdot \left(10^{-1}\right) = 3531kN$$

$$M_s = \frac{500kN \cdot 2cm \cdot 10^{-2} + 100kNm}{1 - \frac{500kN}{3531kN}} = 128kNm$$

$$P_{u1} = \frac{P_u}{n} + \frac{M_s}{n_1 \cdot h} \cdot \left(10^2\right) = \frac{500kN}{2} + \frac{128kNm}{1 \cdot 35{,}98cm} \cdot \left(10^2\right) = 606kN$$

La resistencia de diseño local a compresión de la barra es igual $P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right)$

$$\lambda_{c1} = \left(\frac{L_1}{r_i}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} = \left(\frac{41{,}54cm}{2{,}14cm}\right) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{235MPa}{200000MPa}} = 0{,}21 < 1{,}5$$

$$F_{cr} = \left(0{,}658^{\lambda^2_c}\right) \cdot F_y = \left(0{,}658^{0{,}21^2}\right) \cdot 235MPa = 230{,}6MPa$$

$$P_{d1} = \phi_c \cdot F_{cr} \cdot A_{g1} \cdot \left(10^{-1}\right) = 0{,}85 \cdot 230{,}6MPa \cdot 32{,}20cm^2 \cdot \left(10^{-1}\right) = 631kN > 606kN \text{ (Verifica)}$$