UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL MENDOZA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL

FLEXION EN CHAPA DOBLADA

- Estados límites últimos
- Aplicación de Cirsoc - 303

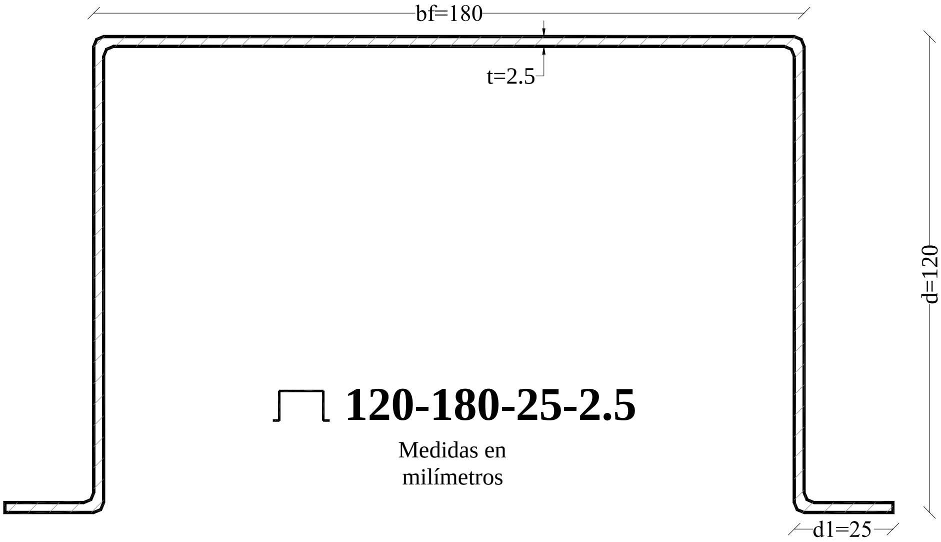
Preparó:
Ing. **Ricardo A. Molina**
Revisó:
Ing. **Daniel A. García Gei**
Dirigió:
Ing. **Daniel A. García Gei**

2003

La siguiente sección pertenece a una correa de acero F24, simplemente apoyada en un ancho de 15 cm, luz L = 6m y arriostramiento continuo en toda su longitud.

Determinar la separación necesaria entre correas para transmitir las cargas indicadas, teniendo en cuenta que la flecha admisible es L/200.

- D = 0.50 kN/m^2 - L = 1.00 kN/m^2



1. RESISTENCIA REQUERIDA

Anexo Capítulo 4

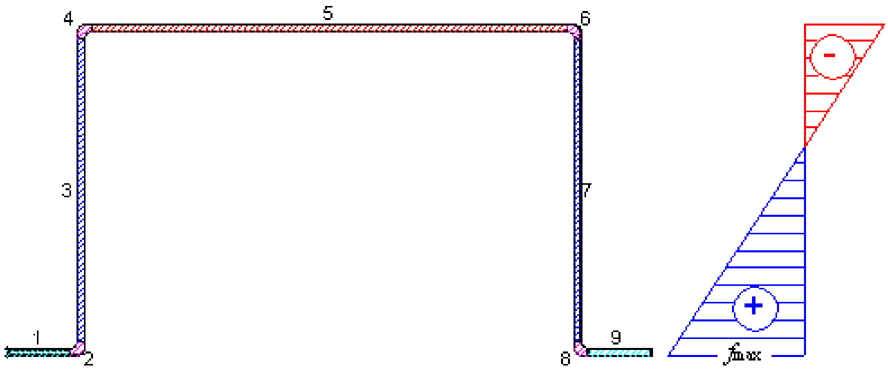
$$q_u = (D + L) \times \gamma \quad - \quad \gamma = 1.60$$

$$q_u = (0.5 + 1) \times 1.6 = 2.40 \text{ kN/m}^2$$

$$M_u = \frac{q_u \times L^2}{8} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{M_u = 10.80\ kNm/m}$$

$$V_u = \frac{q_u \times L}{2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{V_u = 7.20\ kN/m}$$

2. TENSIONES LIMITES - CONDICIONES GEOMÉTRICAS



Las tensiones de flexión, en ningún elemento de la sección superarán el valor:

Anexo Capítulo 4

$$\boxed{f_{max} \le F_{Lim}}$$

F_{Lim} = Tensión límite = $Q_s \times F_{bd}$

Q_s = Relación entre la máxima tensión que puede desarrollar el elemento $f_{crit.}$ y la tensión de fluencia. Coeficiente de pandeo local para elementos no rigidizados.

F_{bd} = Tensión básica de diseño = $\phi_a \times F_y$

ϕ_a = Coeficiente de funcionamiento. Factor de resistencia = 0.90

El valor de Qs depende del tipo de solicitación impuesta al elemento analizado, y de su condición de vínculo, es decir si se trata de un elemento Rigidizado o No rigidizado.

La esbeltez de cada elemento no debe superar el valor máximo indicado para cada caso.

2.1 Labios – Elementos 1 y 9

$$H1 = \frac{h1}{t} \quad ; \quad h1 = d1 - (r + t) = 25-(2.5 + 2.5) = 20mm$$

$$H1 = \frac{20}{2.5} = 8.00 < H1max = 60$$ Artículo 4.4.6.1

Elemento Traccionado $\Rightarrow$ Qs = 1

$$F_{Lim} = 1 \times 0.9 \times 240 = 216 \text{ Mpa}$$

2.2 Almas – Elementos 3 y 7

$$H = \frac{h}{t} \quad ; \quad h = d - 2 \times (r + t) = 120-2 \times (2.5 + 2.5) = 110mm$$

$$H = \frac{110}{2.5} = 44.00 < Hmax = 150$$ Artículo 4.4.6.2

Si bien, estos elementos no estarán totalmente traccionados, los consideraremos como tal $\Rightarrow$ Qs = 1 Artículo 4.4.13

$$F_{Lim} = 1 \times 0.9 \times 240 = 216 \text{ Mpa}$$

2.3 Ala – Elemento 5

$$B = \frac{b}{t} \quad ; \quad b = bf - 2 \times (r + t) = 180-2 \times (2.5 + 2.5) = 170mm$$

$$B = \frac{170}{2.5} = 68.00 < Bmax = 500$$ Artículo 4.4.6.1

Elemento comprimido rigidizado por almas $\Rightarrow$ Qs = 1 Artículo 4.4.13

$$F_{Lim} = 1 \times 0.9 \times 240 = 216 \text{ Mpa}$$

3. CAPACIDAD A FLEXION

La capacidad a flexión de una sección, esta dada por el producto entre su módulo resistente elástico y la tensión máxima que es capaz de desarrollar, es decir por la F_{Lim} del elemento más alejado del eje neutro.

Ahora bien, en secciones de chapa doblada los elementos comprimidos sufren el fenómeno de pandeo local, por el cual las fibras que pandean dejan de contribuir para la transmisión de esfuerzos. Por lo tanto, en el cálculo del módulo resistente elástico solo se debe incluir aquellos elementos o partes de ellos que no alcancen tensiones de pandeo, es decir elementos efectivos.

Para el cálculo del ancho efectivo be, de los elementos comprimidos se utiliza la siguiente expresión:

$$\boxed{Be = \frac{be}{t} = 1.30 \times g - R \leq B}$$ Artículo 4.4.9

$R = 0.1 \times B - 6$; $R = 0$, si el elemento esta rigidizado en ambos bordes por un alma Artículo 4.4.9

g = Función característica de tensiones = $\sqrt{\frac{E}{f}}$

E = Módulo de Elasticidad longitudinal del acero = 210000 Mpa

f = Tensión máxima correspondiente al ancho efectivo be.

El valor de f depende del módulo resistente elástico efectivo de la sección, el cual depende de la tensión alcanzada en los elementos comprimidos, es decir de f.

Por lo tanto, para salvar esta indeterminación, el valor de f se calcula con un proceso de aproximaciones sucesivas, según se indica a continuación:

1) Se propone un valor de f.

2) Se calcula be con la expresión anterior.

3) Se determina el valor de yg.

4) Se calcula el valor de f con la siguiente expresión:

$$f = \frac{F_{Lim}}{(d - yg)} \times yg \qquad \text{(Relación de triángulos)}$$

La sección del ala (comprimida), a pesar de su reducción por pandeo local, será mayor que el área de los labios (traccionados), por lo tanto el eje neutro efectivo estará más cerca del borde comprimido y entonces la mayor tensión F_{Lim} se alcanzará en el borde traccionado, y la tensión f en el borde comprimido.

5) Se compara el valor de f calculado, con el valor de f propuesto. Si son aproximadamente iguales se detiene la iteración, caso contrario se propone otro valor y se continua iterando.

Utilizando las expresiones que se indican, deducidas del Método de la línea, se han realizado los correspondientes cálculos y los resultados se han colocado en la planilla de la página siguiente:

$$\mathbf{yg} = \frac{\sum Ai \times yi}{\sum Ai} \quad ; \quad Ai = l_i \times t \quad \Rightarrow \quad \mathbf{yg} = \frac{\sum \ell i \times yi}{\sum \ell i}$$

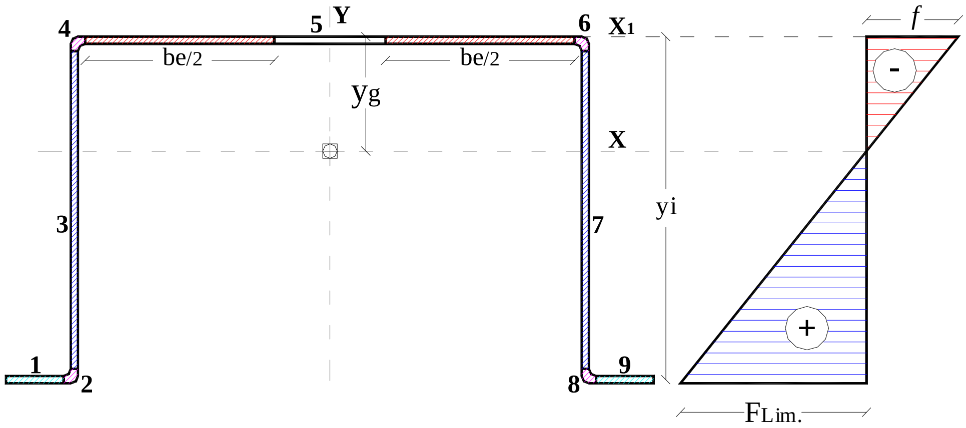
$$Ix1 = Ix + Ag \times yg^2 \quad \Rightarrow \quad Ix = Ix1 - Ag \times yg^2 \quad ; \quad Ix1 = \sum Ixo + \sum (Ai \times yi^2)$$

$$Ix1 = \text{Momento de inercia respecto al eje } X1 \; ; \quad Ixo = \frac{\ell i^3 \times t}{12} \quad \text{(Elementos Verticales)}$$

$$Ixo = 0 \quad \text{(Elementos horizontales y curvos)} \Rightarrow Ix1 = \left(\sum \frac{\ell i^3}{12} + \sum (\ell i \times yi^2) \right) \times t \quad \Rightarrow$$

$$\mathbf{Ag} = \sum \ell i \times t \quad \Rightarrow \quad \mathbf{Ix} = \left(\sum \frac{\ell i^3}{12} + \sum (\ell i \times yi^2) - \sum (\ell i) \times yg^2 \right) \times t$$

$$\boxed{\mathbf{Sxc} = \frac{Ix}{yg}} \qquad \boxed{\mathbf{Sxt} = \frac{Ix}{d - yg}}$$



Propiedades Mecánicas					
Fy [Mpa]	ϕa	FLim [Mpa]	**E** [Mpa]	f (Propuesto) [Mpa]	**g**
240	0.90	216	210000	143.20	38.30

Dimensiones Efectivas					
Be	**be** [mm]	**d** [mm]	**d1** [mm]	**r** [mm]	**t** [mm]
49.78	134	120	25	2.5	2.5

Propiedades Geométricas Efectivas					
Elemento	Longitud l_i [cm]	Distancia al borde más comprimido yi [cm]	Momentos estáticos $l_i \times y_i$ [cm^2]	Momentos de 2º órden $l_i \times y_i^2$ [cm^3]	Momentos de inercia Ixo [cm^3]
1	2.00	11.88	23.75	282.03	0
2	0.59	11.91	7.02	83.54	0
3	11.00	6.00	66.00	396.00	110.92
4	0.59	0.09	0.05	0.00	0
5	**12.45**	0.13	1.56	0.19	0
6	0.59	0.09	0.05	0.00	0
7	11.00	6.00	66.00	396.00	110.92
8	0.59	11.91	7.02	83.54	0
9	2.00	11.88	23.75	282.03	0
Σ	40.80	-	195.19	1523.36	221.83

Ag [cm^2]	**yg** [cm]	f (Calculado) [Mpa]	**Ix** [cm^4]	**Sxc** [cm^3]	**Sxt** [cm^3]
10.20	4.78	**143.20**	202.85	**42.40**	**28.11**

Luego, la capacidad de la sección (resistencia de diseño) está dada por:

$$M_d = S_{xc} \times f = S_{xt.} \times F_{Lim}$$

$$M_d = 42.40 \times 143.20 \times 10^{-3} \Rightarrow \mathbf{M_d = 6.07\ kNm}$$

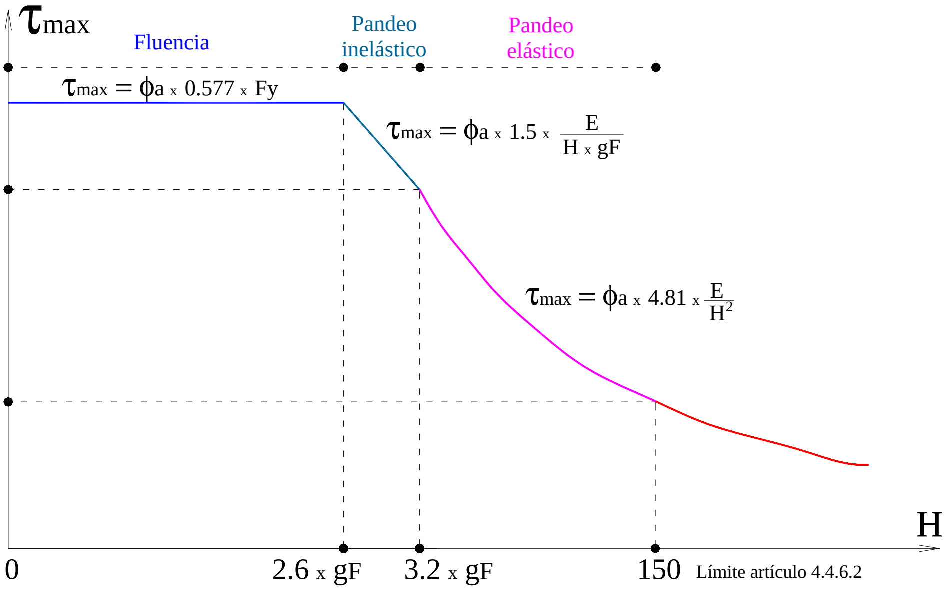
Finalmente, la separación entre correas es:

$$S = \frac{M_d}{M_u} = \frac{6.07}{10.80} = 0.56 \text{ m} \Rightarrow \underline{\mathbf{S = 0.55\ m}}$$

4. CAPACIDAD A CORTE DEL ALMA

La tensión tangencial de corte promedio τ en un alma de chapa delgada no debe superar los valores indicados en el siguiente gráfico:

Anexo Capítulo 4



gF = Función característica de tensiones = $\sqrt{\dfrac{E}{Fy}}$ - (Referida a la tensión de fluencia)

$$gF = \sqrt{\frac{210000}{240}} = 29.58 \quad \Rightarrow \quad H = 44 < 2.6 \times gF = 76.9 \quad \Rightarrow \quad \textbf{Zona de Fluencia}$$

$$\tau max = 0.90 \times 0.577 \times 240 = 124.63 \text{ Mpa}$$

$$\tau = \frac{Vu \times 10}{2 \times Aa} \quad ; \quad 2 \times Aa = 2 \times h \times t = 2 \times 11 \times 0.25 = 5.50 \text{ cm}^2 \text{ (2 almas)}$$

$$Vu = 7.20 \times 0.55 \text{ (Separación)} = 3.96 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{3.96 \times 10}{5.50} = 7.20 \text{ Mpa} \; < \; \tau max \; \Rightarrow \; \textbf{VERIFICA}$$

5. PANDEO LOCAL DEL ALMA

Para evitar el pandeo del alma no reforzada, las reacciones de vinculo en el plano del alma no deben sobrepasar el valor dado a continuación:

Anexo Capítulo 4

Vu = Reacción extrema en viga con alma simple sin rigidizar $\Rightarrow$

$$Pmax = \phi fa \times 0.0185 \times t^2 \times Fy \times (98 + 4.2 \times A - 0.022 \times A \times H - 0.011 \times H) \times (1.15 - 0.15 \times n) \times (4 - k)$$

A = Relación ancho de apoyo sobre espesor del alma = $\dfrac{100}{2.5}$ = 40 < H

n = Relación entre radio interno de plegado y el espesor del alma = r/t = 1

$\phi fa = 0.75 \quad ; \quad k = (29.9/gF)^2 = 1.04$

Reemplazando valores se obtiene:

$$Pmax = 13971.77 \text{ N}$$

$$Pmax = 13.97 \text{ kN} \; > \; Vu / 2 \text{ (2 almas)} = 1.98 \text{ kN} \; \Rightarrow \; \textbf{VERIFICA}$$

6. ESTADOS LIMITES DE SERVICIO

Para analizar los estados de servicio se aplica el **Método de Tensiones Admisibles** según el capítulo 4.5.

La capacidad a flexión se determina aplicando las expresiones desarrolladas en el punto 3, reemplazando el valor de $F_{bd} = \phi_a \times F_y$, por $F_{bd} = F_y / \gamma$.

Luego, las tensiones de flexión en ningún elemento de la sección superarán el valor:

$$\boxed{f_{max} \leq F_{adm}} \quad - \quad F_{adm} = \text{Tensión admisible} = Q_s \times F_{bd}$$ Artículo 4.5.3

El estado límite de servicio a analizar es la deformación, por lo tanto es necesario determinar el momento de inercia efectivo de la sección. Para ello se aplica el procedimiento iterativo indicado, obteniéndose los resultados siguientes:

Propiedades Mecánicas					
Fy [Mpa]	**γ**	Fadm [Mpa]	**E** [Mpa]	***f*** (Propuesto) [Mpa]	**g**
240	1.60	150	210000	87.38	49.02

Dimensiones Efectivas					
Be	**be** [mm]	**d** [mm]	**d1** [mm]	**r** [mm]	**t** [mm]
63.73	169	120	25	2.5	2.5

Propiedades Geométricas Efectivas					
Elemento	Longitud l_i [cm]	Distancia al borde más comprimido y_i [cm]	Momentos estáticos $l_i \times y_i$ [cm^2]	Momentos de 2º órden $l_i \times y_i^2$ [cm^3]	Momentos de inercia I_{xo} [cm^3]
1	2.00	11.88	23.75	282.03	0
2	0.59	11.91	7.02	83.54	0
3	11.00	6.00	66.00	396.00	110.92
4	0.59	0.09	0.05	0.00	0
5	**15.93**	0.13	1.99	0.25	0
6	0.59	0.09	0.05	0.00	0
7	11.00	6.00	66.00	396.00	110.92
8	0.59	11.91	7.02	83.54	0
9	2.00	11.88	23.75	282.03	0
Σ	44.29	-	195.63	1523.41	221.83

Ag [cm^2]	**yg** [cm]	***f*** (Calculado) [Mpa]	**Ix** [cm^4]	**Sxc** [cm^3]	**Sxt** [cm^3]
11.07	4.42	87.38	**220.28**	49.87	29.05

Finalmente, teniendo en cuenta que las cargas deben utilizarse sin mayorar, se obtiene el siguiente valor de flecha:

$$f_{max} = \frac{5}{384} \times \frac{q_u \times S \times L^4}{\gamma \times E \times I_x} \quad \Rightarrow \quad f_{max} = \frac{5}{384} \times \frac{2.4 \times 0.55 \times 600^4 \times 10^{-1}}{1.6 \times 210000 \times 220.28} = 3 \text{ cm}$$

$$f_{adm} = \frac{L}{200} \quad \Rightarrow \quad f_{adm} = \frac{600}{200} = 3 \text{ cm} = f_{max} \quad \Rightarrow \quad \textbf{VERIFICA}$$