



CURSO DE DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE ARMAZENAGEM TIPO PORTA PALLETS

**Dimensionamento de Elementos
de estruturas porta paletes
Colunas, bases e espaçadores**

Dimensionamento de placas de base

Resistência do piso de concreto

$$f_j = \frac{2,5 \cdot f_{ck}}{1,50} \quad f_j = 1,67 f_{ck}$$

$$e_{ef} = t_b \sqrt{\frac{F_y}{3f_j}} \quad N_{C_{Rd}} = f_j \cdot A_{bas}$$

t_b é a espessura da placa de base;

f_y é a resistência de cálculo da placa de base;

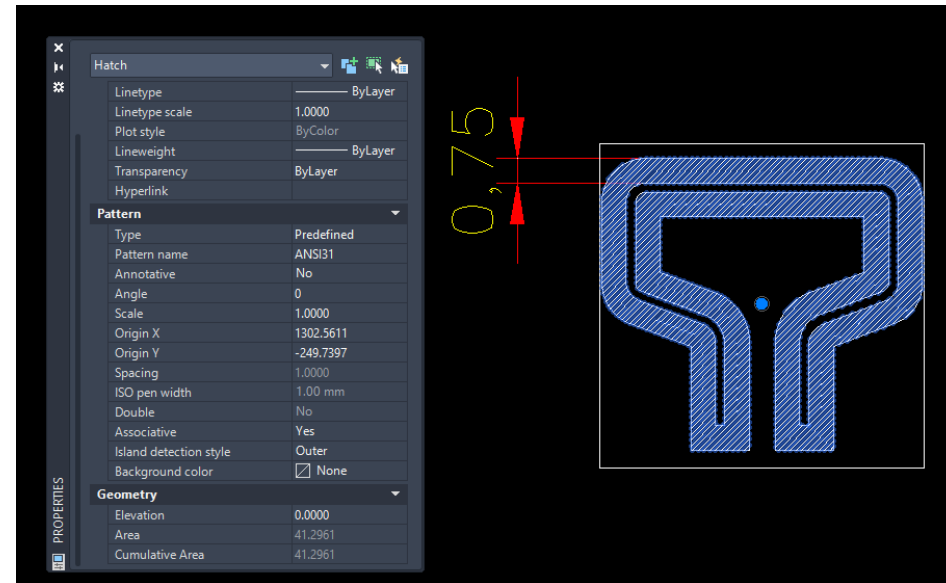
f_j é a resistência de cálculo do material do piso (ver 9.10).

A_{bas} é a área efetiva da placa de base

Exemplo: determinar a capacidade da placa de base, de espessura 4,76mm, material ASTM A36 abaixo, considerando concreto f_{ck} 20Mpa.

$$f_j = 1,67 f_{ck} \rightarrow F_j = 1,67 \cdot 2 = 3,34 \text{ kN/cm}^2$$

$$e_{ef} = t_b \sqrt{\frac{F_y}{3f_j}} \quad e_{ef} = 0,476 \sqrt{\frac{25}{3 \cdot 3,34}} = 0,75 \text{ cm}$$



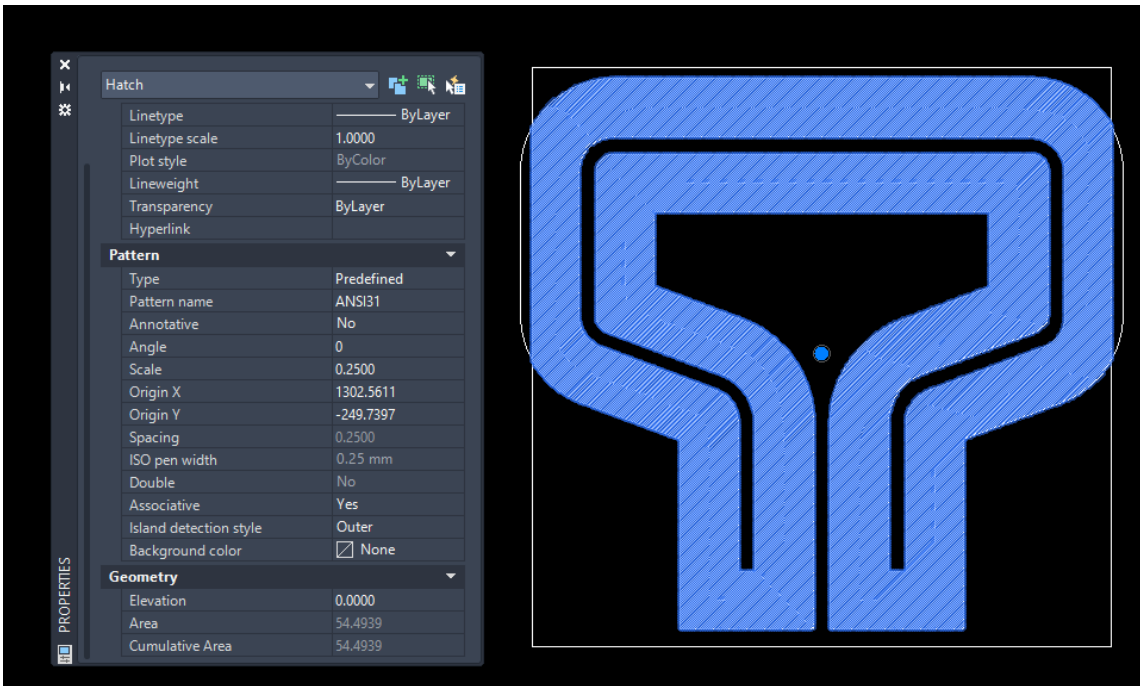
$$N_{C_{Rd}} = f_j \cdot A_{bas} \quad N_{C_{Rd}} = 3,34 \cdot 41,29 = 137,90 \text{ kN}$$

Dimensionamento de placas de base

Exemplo 2: determinar a capacidade da placa de base, de espessura 6,35mm, material ASTM A36 abaixo, considerando concreto f_{ck} 20Mpa.

$$f_j = 1,67 f_{ck} \rightarrow F_j = 1,67 \cdot 2 = 3,34 \text{ kN/cm}^2$$

$$e_{ef} = t_b \sqrt{\frac{F_y}{3f_j}} \quad e_{ef} = 0,635 \sqrt{\frac{25}{3 \cdot 3,34}} = 1,00 \text{ cm}$$



$$N_{cRd} = f_j \cdot A_{bas} \quad N_{cRd} = 3,34 \cdot 54,50 = 182 \text{ kN}$$

Dimensionamento de Chumbadores

Chumbadores devem ser dimensionados para cargas obtidas na análise estrutural, ou, para no mínimo 3kN de tração e 5 kN de esforço cortante



Código	Diâmetro da rosca (pol)	Comprimentos		Furo		Distâncias ⁽³⁾ (mm)		Espessura máxima à fixar ⁽⁴⁾	Chave (pol)	Torque de aperto (kgf.m)	Cargas últimas ⁽²⁾ (kgf)	
		Parafuso (mm)	Jaqueta (mm)	Diâm. (pol - mm)	Prof. mín. ⁽¹⁾ (mm)	Fixador Fixador	Fixador Borda				Tração	Corte
XA36040	3/16"	40	30	1/4" - 6,5	40	111	55	5	5/16"	0,5	500	402
XA36065		65	52					23				
XA14045	1/4"	45	32	5/16" - 8	40	117	58	3	7/16"	1	1.085	707
XA14070		75	60					27				
XA56055	5/16"	55	40	3/8" - 10	50	141	70	3	1/2"	3	1.550	1.162
XA56080		80	65					25				
XA56105		105	90					50				
XA38065	3/8"	65	48	1/2" - 13	55	156	78	6	9/16"	5	2.450	1.703
XA38080		80	63					21				
XA38110		110	90					48				
XA12070*	1/2"	70	46	5/8" - 16	55	159	79	3	3/4"	8	3.020	3.030
XA12090*		90	66					21				
XA12120*		120	87					42				
XA12130*		130	101					56				
XA12170*		170	144					99				
XA58080	5/8"	80	54	3/4" - 19	60	168	84	4	15/16"	10	3.840	4.933
XA58120		120	90					40				
XA58175		175	147					97				

* 1/2" UNC - 13 fios.
(1) Profundidade mínima. (2) Os valores obtidos são baseados sobre a média de ensaios e especificações técnicas, com uso de aço ABNT 1010/1020 e concreto de 30MPa.
Atenção: esses valores são cargas últimas, utilize sempre **coeficiente de segurança**. Para mais informações, consulte a seção **Dados Técnicos** **pág. 135**.
(3) Distância mínima recomendada, para menores consulte o departamento técnico.
(4) Para montagem passante.

Diâmetro necessário para chumbadores e parafusos sujeitos à tração e cisalhamento combinados (Barras rosqueadas com compound químico)

$$V_{Rd} = \frac{0,40 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot F_u}{4 \cdot 1,35} \qquad T_{Rd} = \frac{0,75 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot F_u}{4 \cdot 1,35}$$

$$\left(\frac{N_{tSd}}{N_{tRd}} \right)^2 + \left(\frac{V_{tSd}}{V_{tRd}} \right)^2 \leq 1 \rightarrow \left(\frac{N_{tSd}}{\frac{0,75 \cdot A_{chu} \cdot F_u}{1,35}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{\frac{0,4 \cdot A_{chu} \cdot F_u}{1,35}} \right)^2 \leq 1$$

$$d_{chu} = \sqrt{1,27 \cdot \sqrt{\frac{11,39 \cdot V_{sd}^2 + 3,24 \cdot N_{sd}^2}{F_u^2}}}$$

Chumbador químico



Diâmetro		Furo		Distância mínima recomendada ⁽⁴⁾ (mm)		Chave (pol)	Torque ⁽⁵⁾ (kgf.m)	Fixações por cartucho ⁽⁶⁾	Cargas últimas ⁽²⁾ (kgf)		Carga característica ⁽³⁾ de acordo com certificação ETA TR029 (kgf)	
(pol)	(mm)	Diâm. (mm)	Prof. ⁽¹⁾ (mm)	Fixador - Fixador	Fixador - Borda				Tração	Corte	Tração	Corte
5/16"	8	10	64	128	64	1/2"	1,5	118	2.191	1.887	1.836	1.560
			96	192	96			78	2.939		2.756	
3/8"	10	12	80	160	80	9/16"	2	68	3.576	2.768	2.727	2.287
			120	240	120			45	4.334		4.090	
1/2"	12	14	96	192	96	3/4"	4,1	58	5.568	4.924	3.926	4.069
			144	288	144			39	7.016		5.890	
5/8"	16	18	128	256	128	15/16"	8,2	26	7.605	8.017	6.614	6.625
			192	384	192			17	11.590		9.920	
3/4"	20	22	160	320	160	1.1/8"	15,3	13	10.480	11.818	9.759	9.766
			240	480	240			8	17.092		14.639	
7/8"	22	25	176	352	176	1.5/16"	18,4	10	14.253	16.272	11.225	13.447
			264	528	264			6	19.944		16.838	
1"	24	28	192	384	192	1.1/2"	22,4	8	16.688	21.304	13.226	17.605
			288	576	288			5	21.848		19.840	
1.1/4"	32	35	256	512	256	1.7/8"	30,6	4	24.070	35.047	16.040	28.962
			384	768	384			2	39.604		24.059	

(1) Profundidades padrões.

(2) Os valores obtidos são baseados sobre a média de ensaios e especificações técnicas, com uso de haste ASTM A193 B7 e concreto de 30MPa.

Atenção: esses valores são cargas últimas, utilize sempre **coeficiente de segurança**. Para mais informações, consulte a seção Dados Técnicos **pág. 135**.

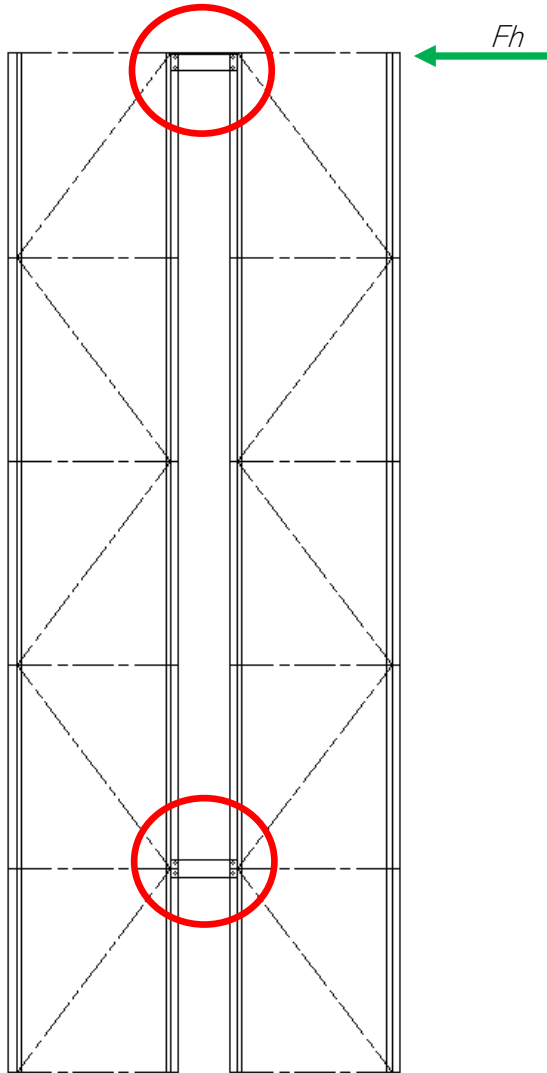
(3) Os valores de resistência característicos são baseados na falha combinada de escorregamento e cone de concreto, de acordo com as premissas de cálculo do ETA TR029. NESTE CASO os **coeficientes de segurança** devem ser considerados de acordo com os parâmetros presentes na certificação do produto.

(4) Distância mínima recomendada, para menores consulte o departamento técnico.

(5) Valores válidos para hastes ASTM A193 B7 / Porcas ASTM A194 2H.

(6) Valores estimados em condições ideais de uso.

Projeto de Distanciadores



Mínimo 2 distanciadores

1 Distanciador adicional por emenda

$N_{tRd}(\text{mín}) = \text{Carga horizontal de Posicionamento}$

Devem ser desconsiderados quando:

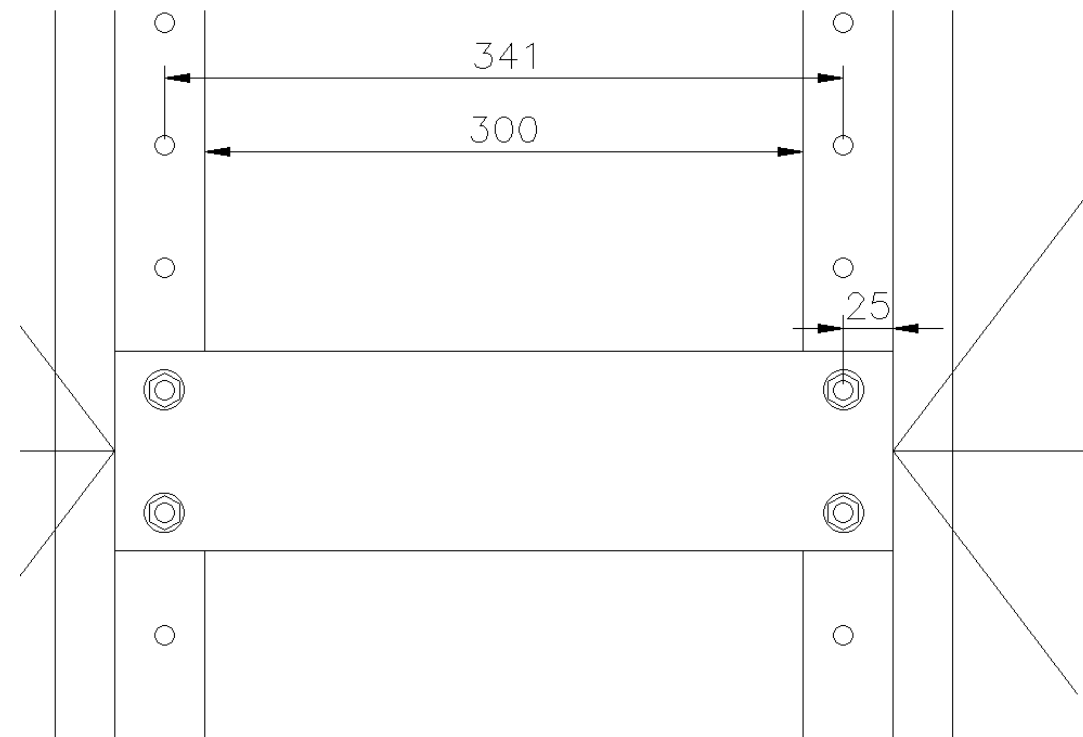
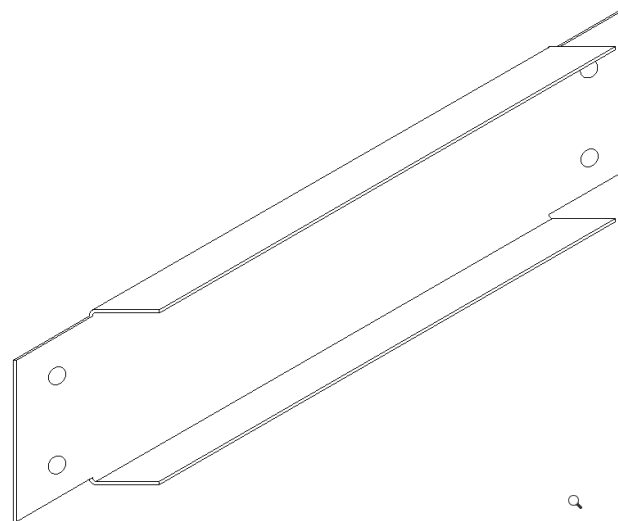
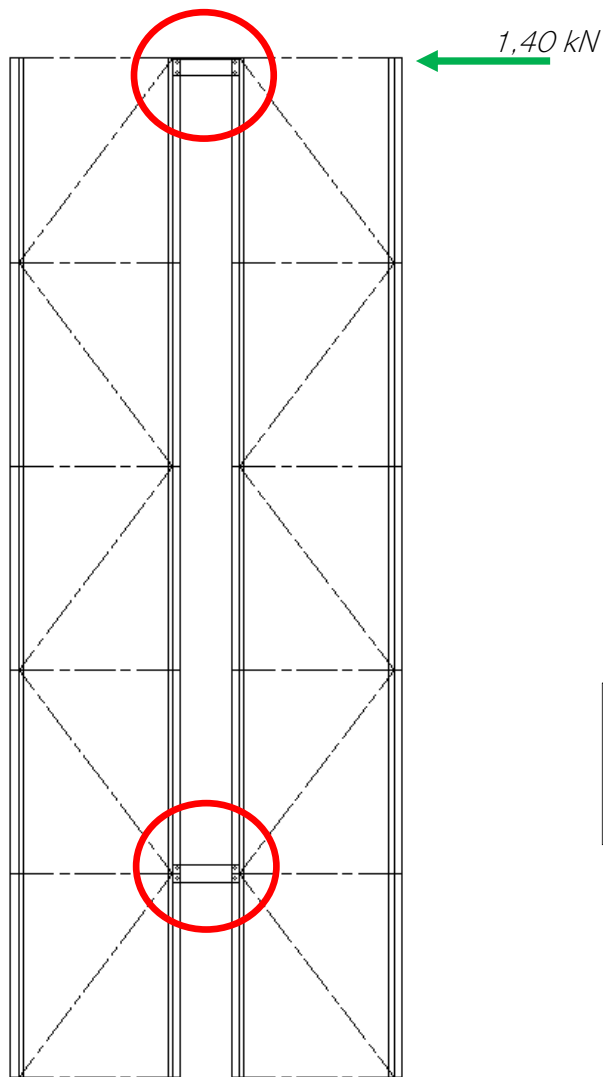
As estruturas forem de fabricantes diferentes

A distância entre elas for maior que 1 m

Filas não são paralelas

Exemplo

Verificar o distanciador abaixo (U 100X40X2,00 – SAE1020)
Parafusos M8 classe 4.6 (espessura da coluna = 2,65mm)



Exemplo

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 53,14}{(1,30)^2} = 11655 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 5,28}{(1,30)^2} = 1158 \text{ kN}$$

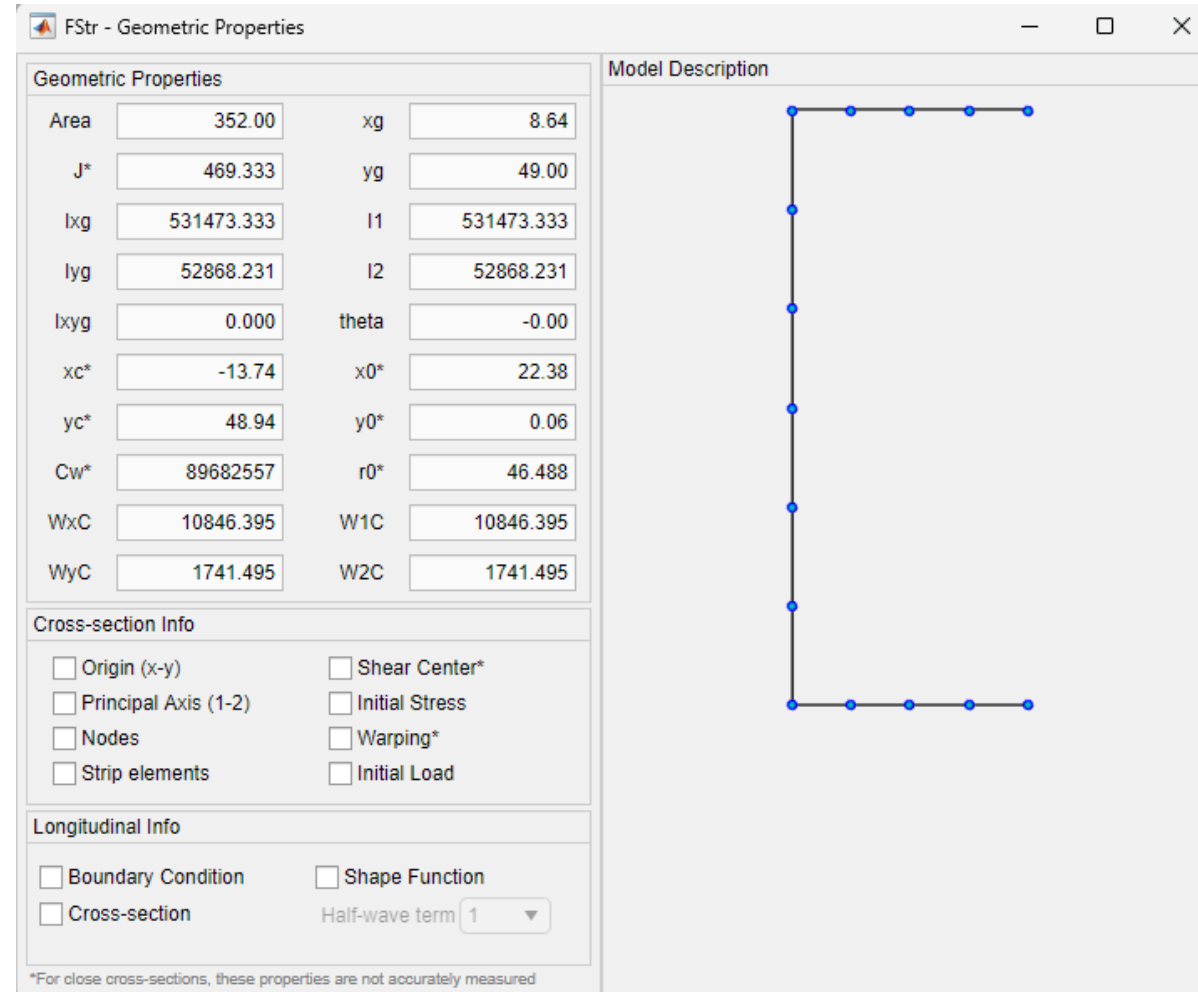
$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{4,65^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 89,68}{30^2} + 7700 \cdot 0,047 \right] = 926 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$N_{Exz} = \frac{11655 + 926}{2 \left[1 - \left(\frac{2,24}{4,65} \right)^2 \right]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 11655 \cdot 926 \left[1 - \left(\frac{2,24}{4,65} \right)^2 \right]}{(11655 + 926)^2}} \right] = \mathbf{908,12 \text{ kN}}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{3,52.24}{908,12}} = 0,31 < 1,5 \quad N_{cre} = (0,658^{0,30^2}) \cdot 3,52.24 = 81,36 \text{ kN}$$



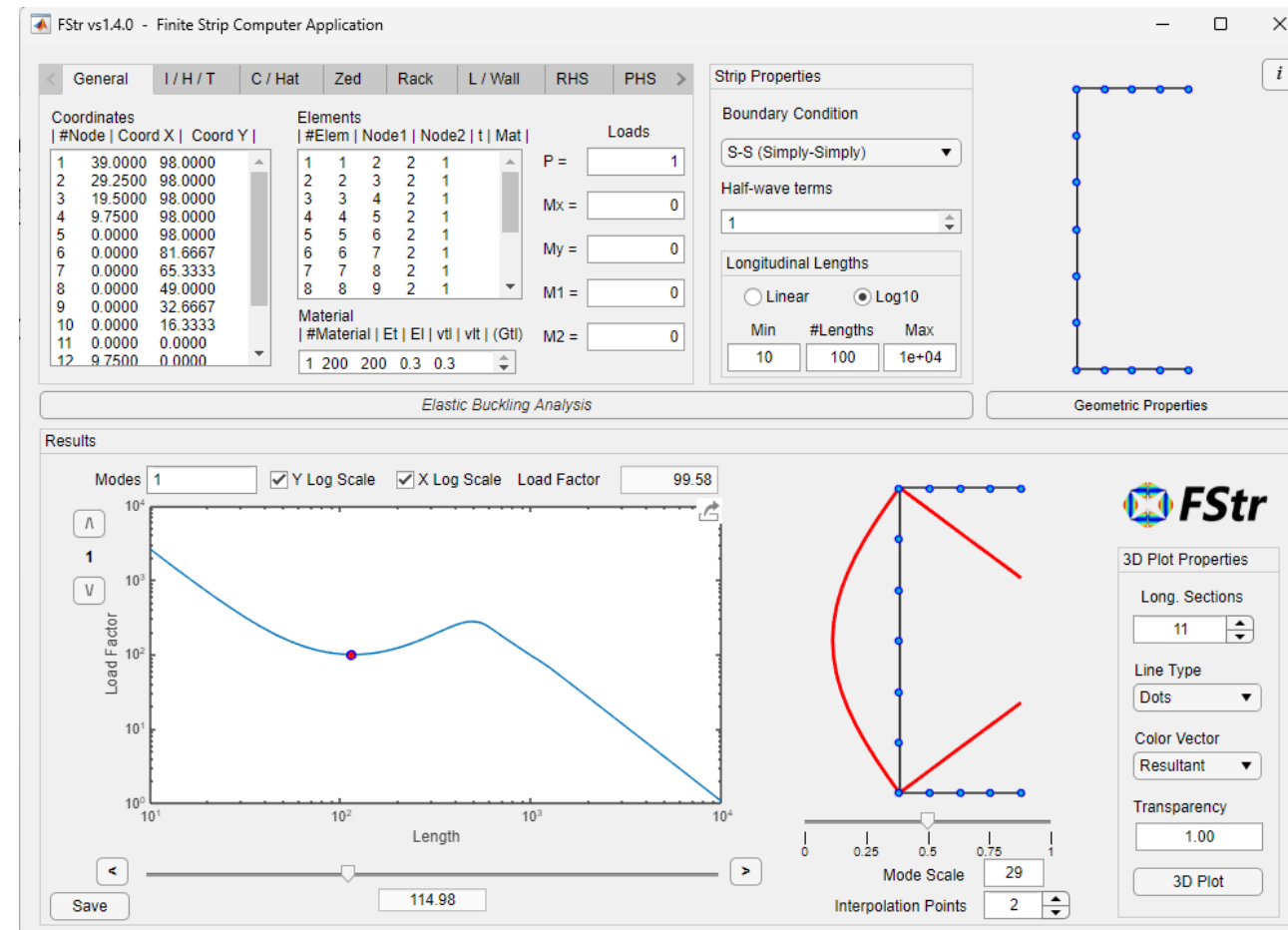
Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{81,36}{99,58}} = 0,90$$

$$Se \lambda_l > 0,776 \quad N_{c,R\ell} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{\ell}^{0,8}}\right) \frac{N_{c,Re}}{\lambda_{\ell}^{0,8}}$$

$$N_{cRl} = \left(1 - \frac{0,15}{0,90^{0,8}}\right) \cdot \frac{3,52 \cdot 24}{0,90^{0,8}} = 76,91 \text{ kN}$$

$$N_{cRd} = \frac{76,91}{1,2} = 64,09 \text{ kN} > 1,40 \text{ kN OK!}$$



Dimensionamento dos parafusos

$$V_{sd} = \frac{1,40}{2} = 0,7 \text{ kN} \rightarrow \text{Adotaremos } 5 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot 0,8^2 \cdot 40}{4 \cdot 1,35} = 5,95 \text{ kN} > 5 \text{ kN OK!}$$

Esmagamento do furo:

$$F_{Rd} = \frac{\alpha_e \cdot d \cdot t \cdot F_u}{1,55} \quad \alpha_e = 0,183 \cdot t + 1,53$$

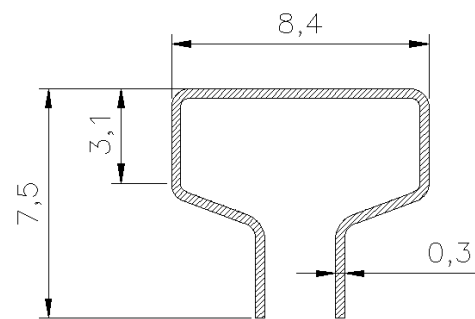
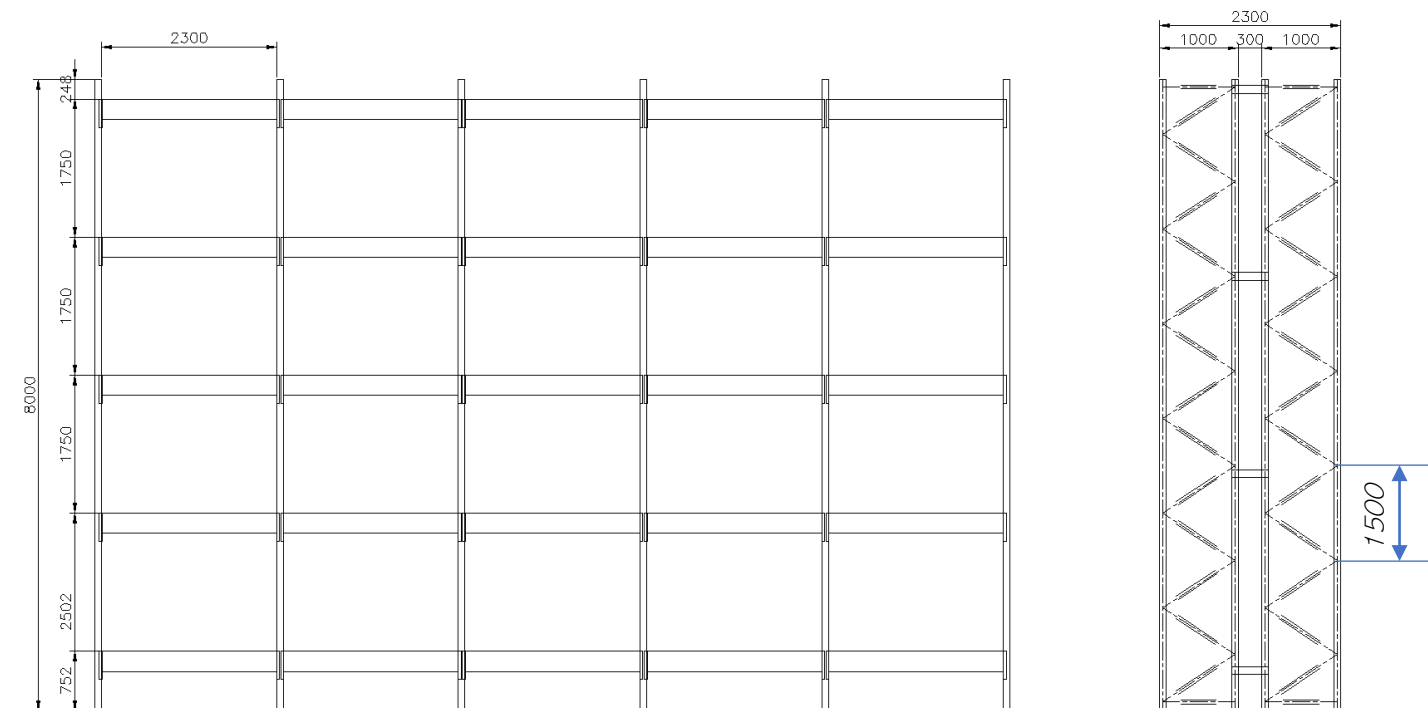
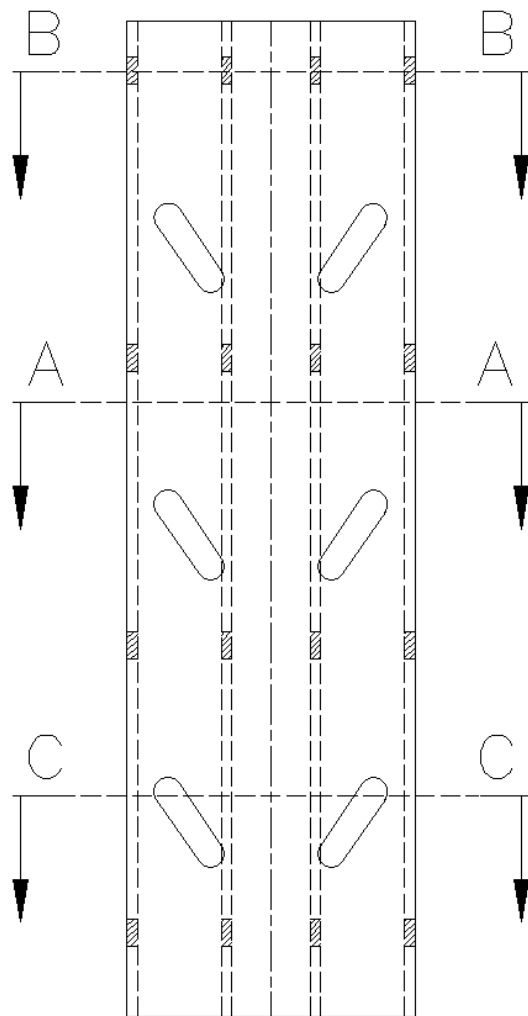
$$\alpha_e = 0,183 \cdot 0,2 + 1,53 \rightarrow 1,56$$

$$F_{Rd} = \frac{1,56 \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 40}{1,55} = 6,44 \text{ kN} > 5 \text{ kN OK!}$$

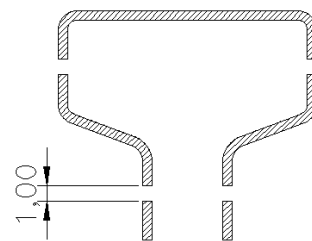
Rasgamento Furo – borda / Rasgamento Furo-Furo

$$F_{Rd} = \frac{t \cdot e \cdot F_u}{1,45} = \frac{0,2 \cdot 2,5 \cdot 40}{1,45} = 13,79 \text{ kN OK!}$$

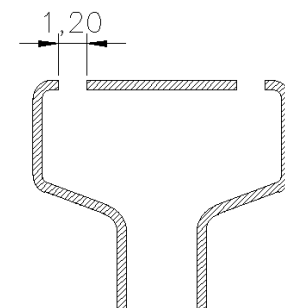
Dimensionamento de colunas



SEÇÃO A



SEÇÃO B

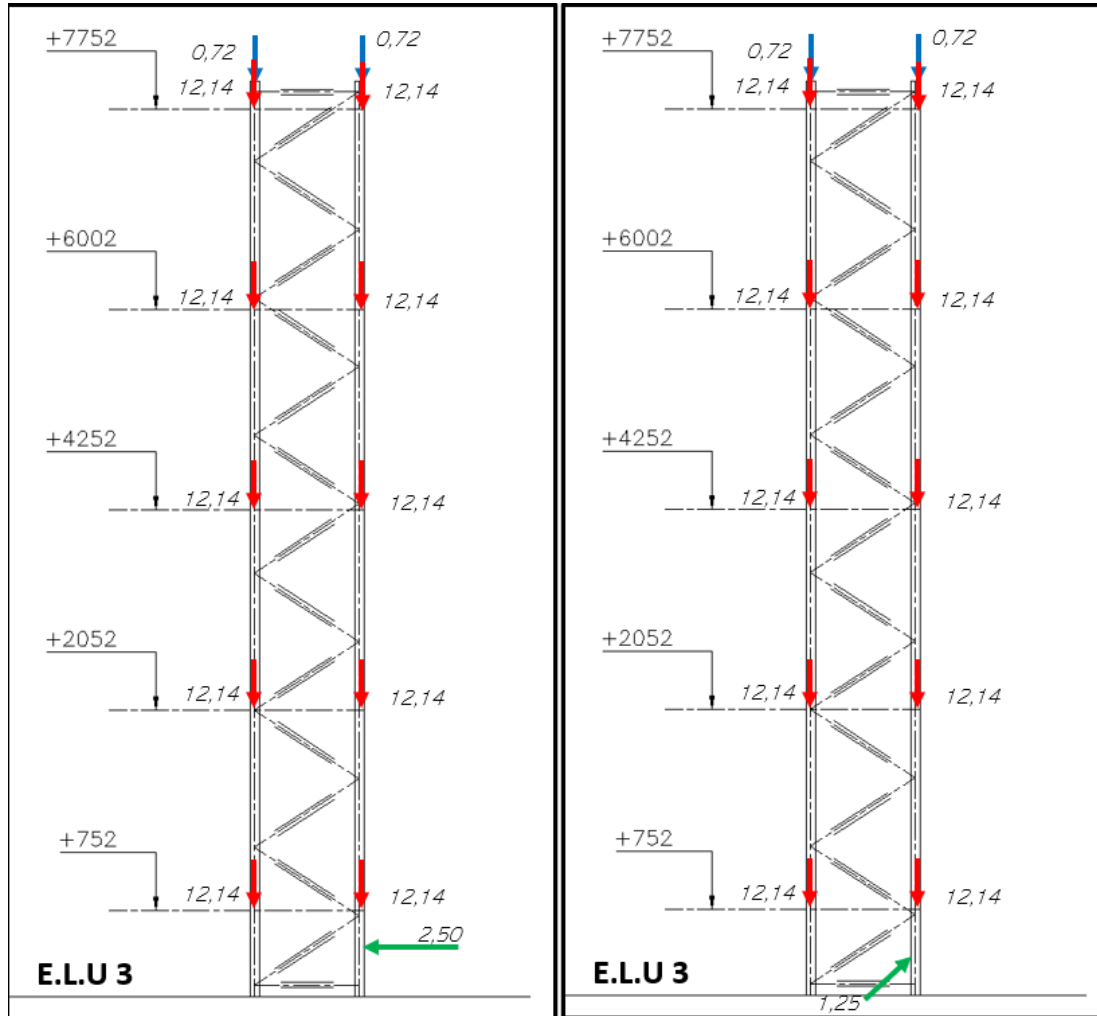


SEÇÃO C

Medidas da seção em cm,
medidas da estrutura em mm

Material: SAE1020

Dimensionamento de colunas



$$N_{cSd} = 5 \times 12,14 = 60,7 \text{ kN}$$

$$M_x = \frac{P \cdot L}{4} = 2,50 \cdot \frac{75}{4} = 46,87 \text{ kN.cm}$$

$$M_y = \frac{P \cdot L}{4} = 1,25 \cdot \frac{75}{4} = 23,43 \text{ kN.cm}$$

$$V_{sd} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ kN}$$

Anexo J

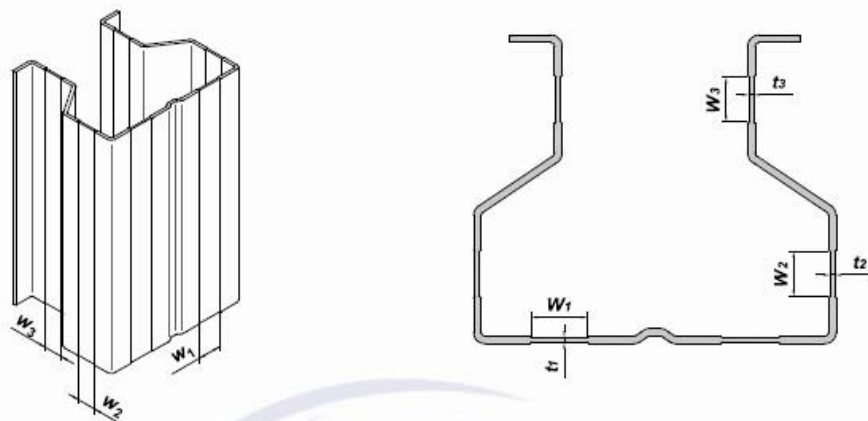


Figura J.3 – Perfil com faixas de espessura equivalente

O cálculo para obter as propriedades dos perfis pode ser feito utilizando-se as equações a seguir:

$$t_i = t \cdot \frac{\Delta h_i - h_i - \xi_j \cdot w_i}{\Delta h_i} \quad (\text{J.1})$$

$$\xi_j = \frac{\Delta h_i - h_i}{2 \cdot w_i} \leq 1,5 \quad (\text{J.2})$$

onde

t_i é a espessura equivalente da faixa;

t é a espessura nominal do perfil;

Δh_i é o passo da furação;

h_i é a altura do furo;

w_i é a largura do furo;

ξ_j é o fator de influência da furação.

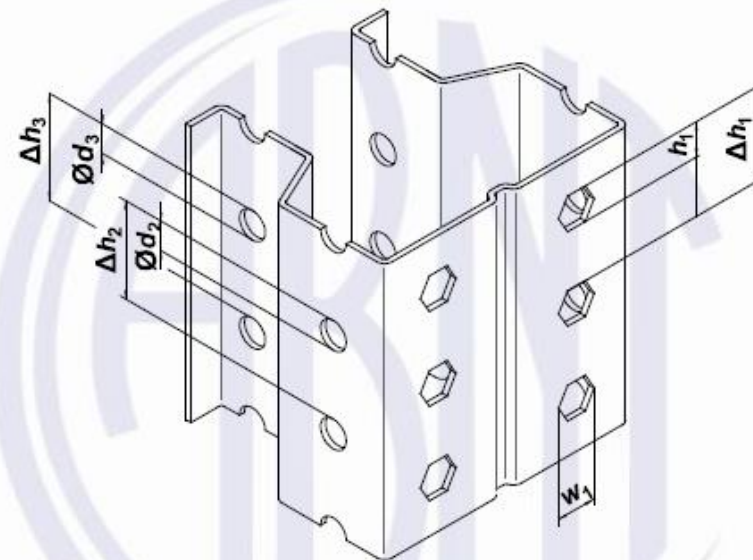


Figura J.1 – Geometria original do perfil

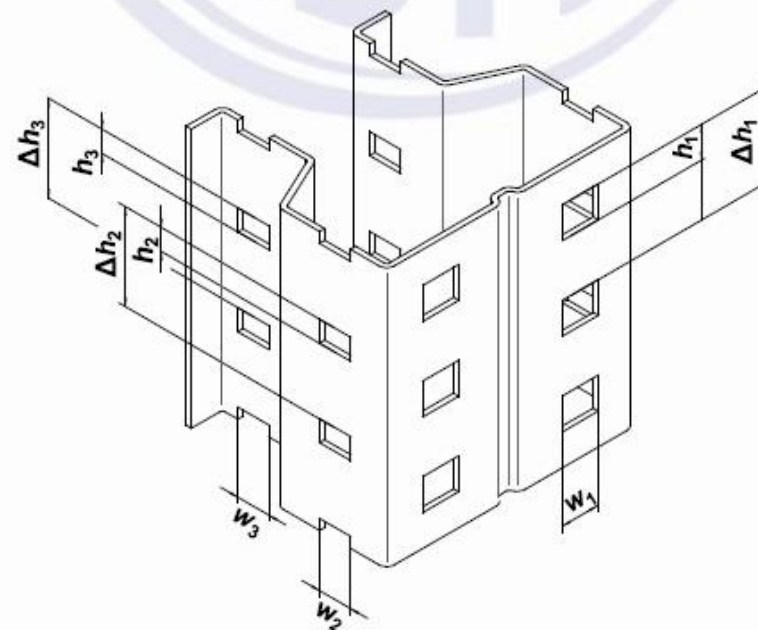


Figura J.2 – Perfil com furações simplificadas

FStr - Geometric Properties

Geometric Properties

Area	798.00	xg	-15.69
J*	2394.000	yg	47.40
I _{xg}	426268.751	I ₁	700624.402
I _{yg}	700624.402	I ₂	426268.751
I _{xyg}	0.046	theta	0.00
x _c *	-15.68	x ₀ *	0.01
y _c *	106.46	y ₀ *	59.06
C _w *	1603402276	r ₀ *	70.000
W _x C	16932.125	W ₁ C	27829.994
W _y C	16681.533	W ₂ C	10149.255

Cross-section Info

☐ Origin (x-y)
 ☐ Shear Center*

☐ Principal Axis (1-2)
 ☐ Initial Stress

☐ Nodes
 ☐ Warping*

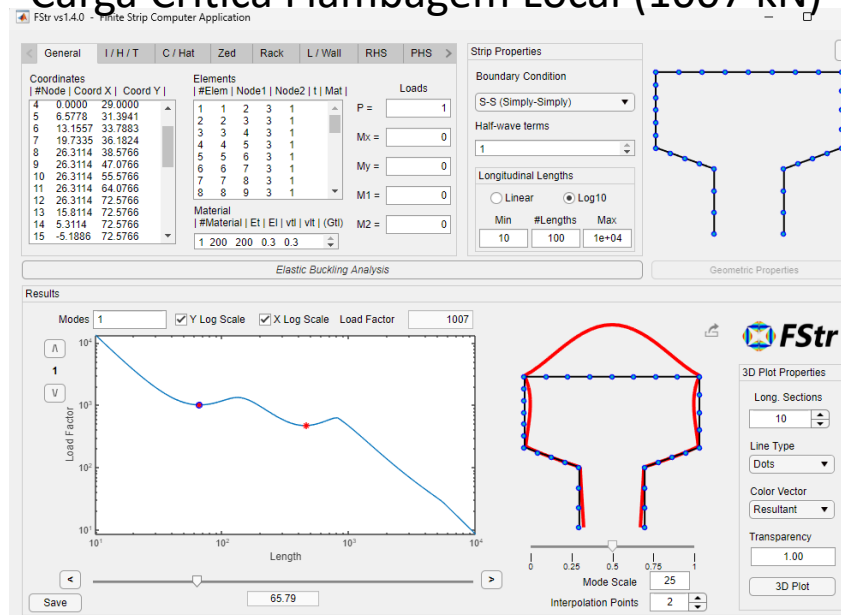
☐ Strip elements
 ☐ Initial Load

Longitudinal Info

☐ Boundary Condition
 ☐ Shape Function

☐ Cross-section
 Half-wave term 1

Model Description



FS3 vs14.0 - Finite Strip Computer Application (7/3/2014)

General I/H/T C/Hat Zed Rack L/Wall RHS PHS

Coordinates

#Node	Coord X	Coord Y
4	0.0000	29.0000
5	6.5778	31.3941
6	13.1557	33.7883
7	19.7335	36.1824
8	26.3114	38.5766
9	26.3114	47.0756
10	26.3114	55.5746
11	26.3114	64.0736
12	26.3114	72.5726
13	15.9114	72.5756
14	5.5114	72.5786
15	-5.1886	72.5766

Elements

#Elem	Node1	Node2	t	Mat
1	1	2	3	1
2	2	3	3	1
3	3	4	3	1
4	4	5	3	1
5	5	6	3	1
6	6	7	3	1
7	7	8	3	1
8	8	9	3	1

Material

#Material	E	EI	vt	vtI	GIt
1	200	200	0.3	0.3	

Loads

P = Mx = My = M1 = M2 =

Strip Properties

Boundary Condition: S-S (Simply-Simply)

Half-wave terms:

Longitudinal Lengths: ☐ Linear ☒ Log10

Min: Max:

Results

Mode: ☒ Y Log Scale ☒ X Log Scale Load Factor:

Load Factor vs Length plot (Log-Log scale). The plot shows a curve with a minimum value of 464.16 at a length of approximately 0.5.

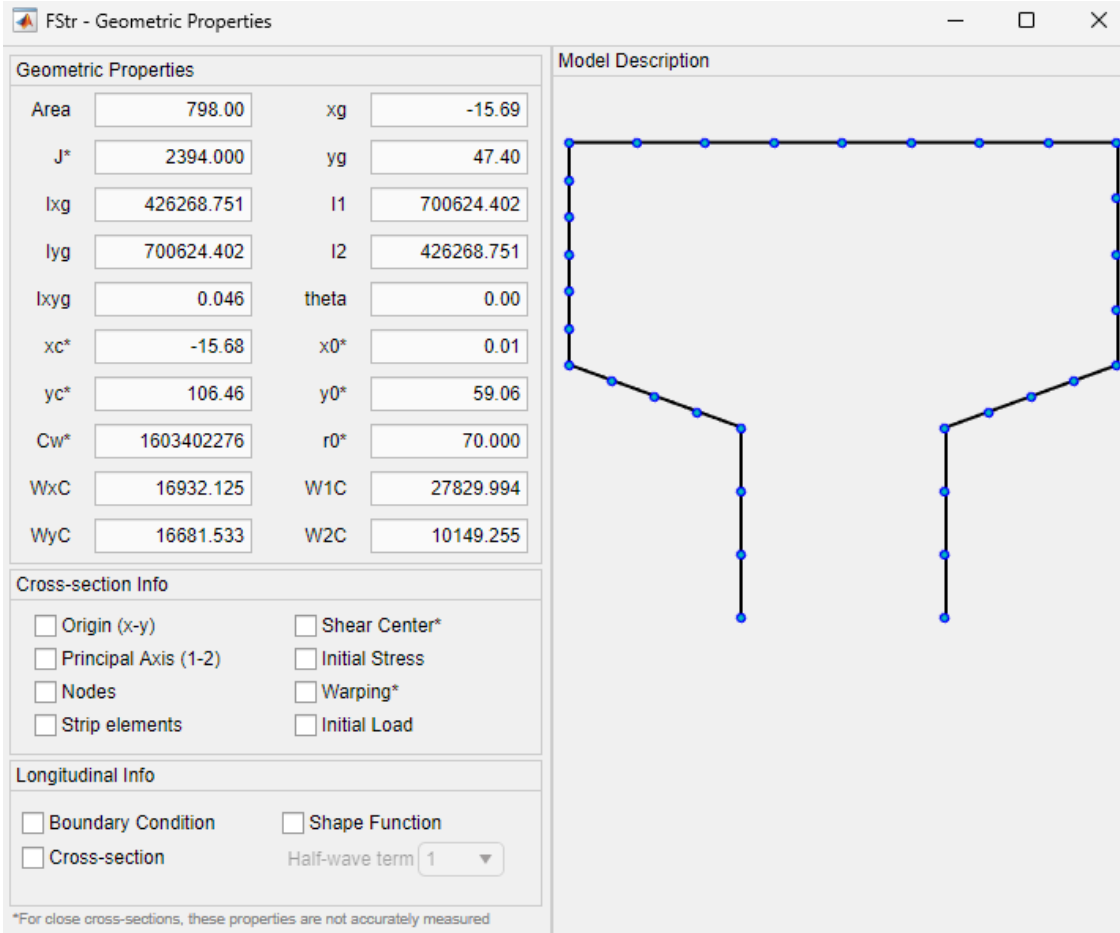
3D Plot Properties:

- Long. Sections:
- Line Type:
- Color Vector:
- Transparency:

Mode Scale: Interpolation Points:

Seção A

Lx = 150cm, Ly = 250cm



$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 42,63}{(1.150)^2} = 374 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 70,06}{(1.250)^2} = 221,26 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{7^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1603}{150^2} + 7700 \cdot 0,24 \right] = 324,71 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

$$1 - \left(\frac{X_0}{r_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{5,906}{7} \right)^2 = 0,47$$

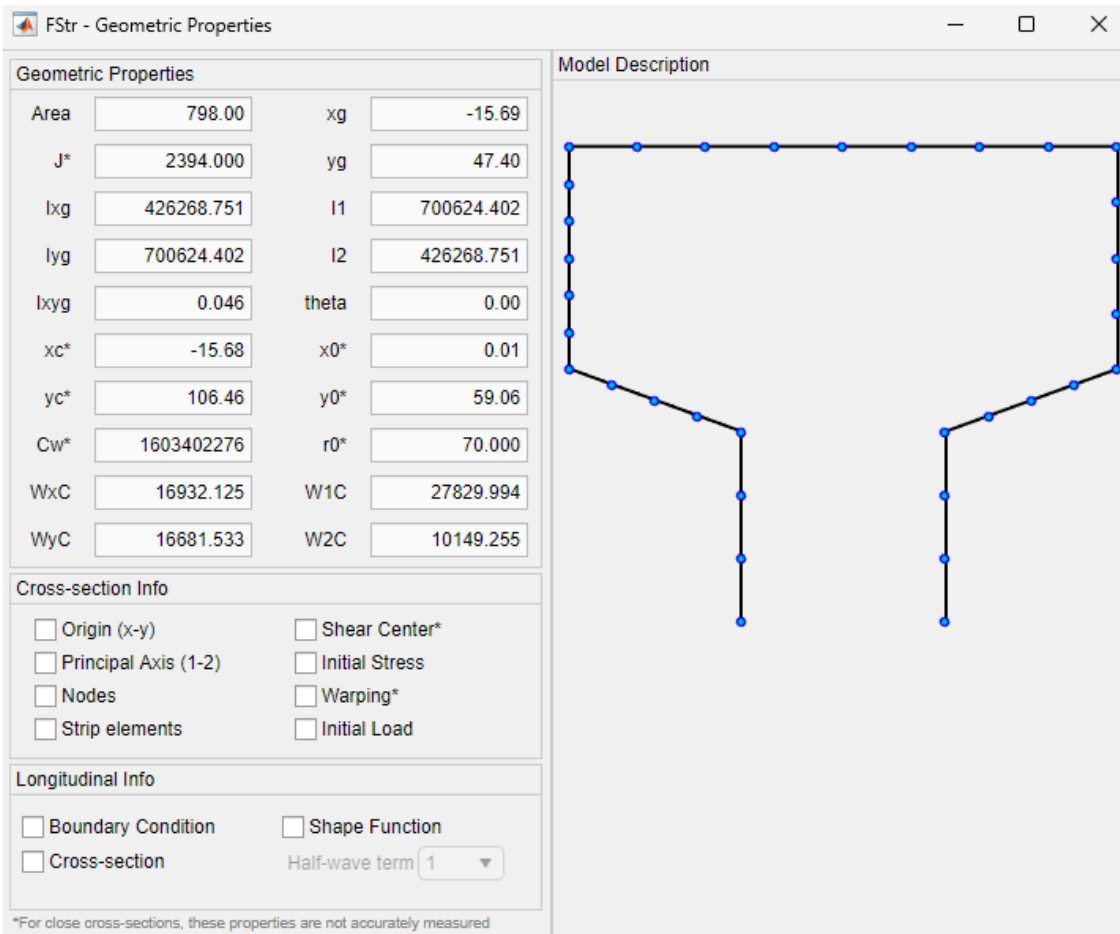
$$N_{Exz} = \frac{221,26 + 324,71}{2 \cdot 0,74} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 221,26 \cdot 324,71 \cdot 0,74}{(221,26 + 324,71)^2}} \right] = 171,42 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{7,98.24}{171,42}} = 0,06 < 1,5$$

$$N_{cre} = (0,658^{1,06^2}) \cdot 7,98.24 = 141,6 \text{ kN}$$

Seção A

Lx = 150cm, Ly = 250cm



Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{141,6}{1007}} = 0,37$$

$$Se \lambda_l \leq 0,776 \quad N_{cRl} = N_{cRe} = 141,6 \text{ kN}$$

Flambagem Distorcional

Carga Crítica para Flambagem

Distorcional: 470 kN

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_{dist}}} \quad \lambda_{dist} = \sqrt{\frac{7,98.24}{470}} = 0,638$$

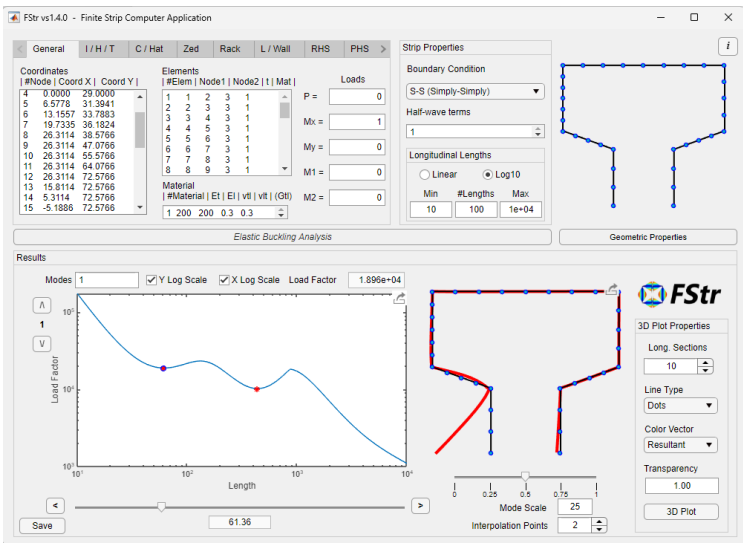
$$Se \lambda_{dist} > 0,561 \quad N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

$$N_{cRdist} = \left(1 - \frac{0,25}{0,638^{1,2}}\right) \cdot \frac{7,98 \cdot 24}{0,638^{1,2}} = 187,62 \text{ kN}$$

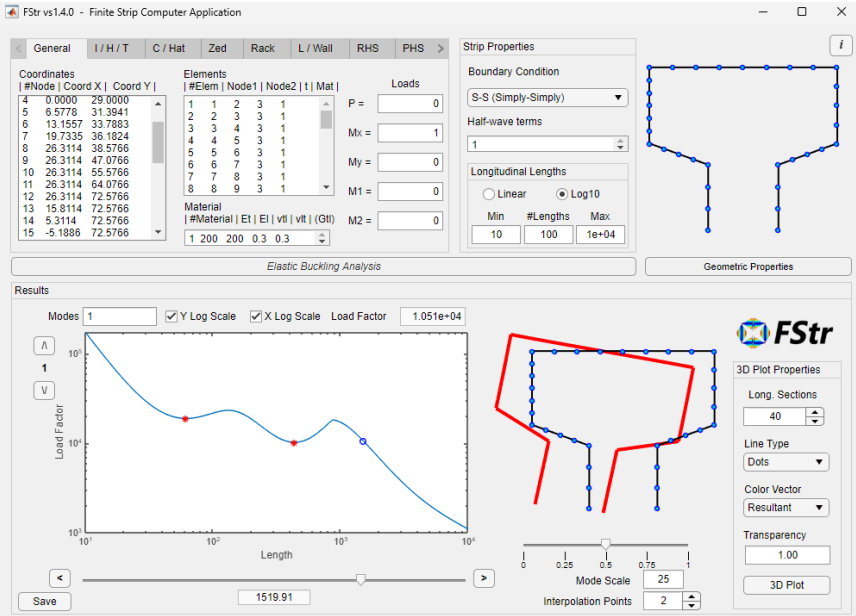
$$N_{CRd} = \frac{141,6}{1,2} = 118 \text{ kN}$$

Seção A (Resistência ao Momento Fletor)

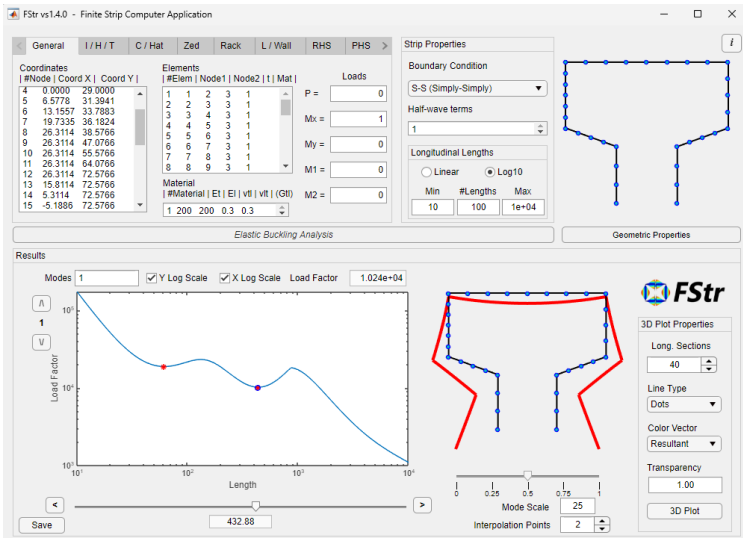
Momento Crítico para Flambagem Local (1896 kN.cm)



Momento Crítico para FLT(1051 kN.cm)



Momento Crítico para Flambagem Distorcional (1024 kN.cm)



Seção A **Lx = 150cm, Ly = 250cm**

Flambagem Lateral com Torção

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{16,93 \cdot 24}{1051}} = 0,621$$

$$\text{Se } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$M_{Re} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot 0,621^2) 16,93 \cdot 24 = 402,66 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{402,66}{1896}} = 0,46$$

$$\text{Se } \lambda_l \leq 0,776 \quad M_{Rl} = M_{Re} = 402,66 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{16,93 \cdot 24}{1024}} = 0,63$$

$$\text{Se } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad N_{c_{Rl}} = 16,93 \cdot 24 = 406,32 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{402,66}{1,2} = 335,55 \text{ kN.cm}$$

Seção A – Resistência ao Esforço cortante

Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por (adotando $\gamma = 1,1$):

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma}$$

$$\text{- Para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E}}{\gamma}$$

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma}$$

onde:

t é a espessura da alma; h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{34}{3} = 11,33$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \quad \lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{20000 \cdot 5}{24}} = 69,71$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot (2 \cdot 3,4 + 2 \cdot 2,9) \cdot 0,3 \cdot 24}{1,1} = 49,50 \text{ kN}$$

Seção A

Lx = 150cm, Ly = 250cm

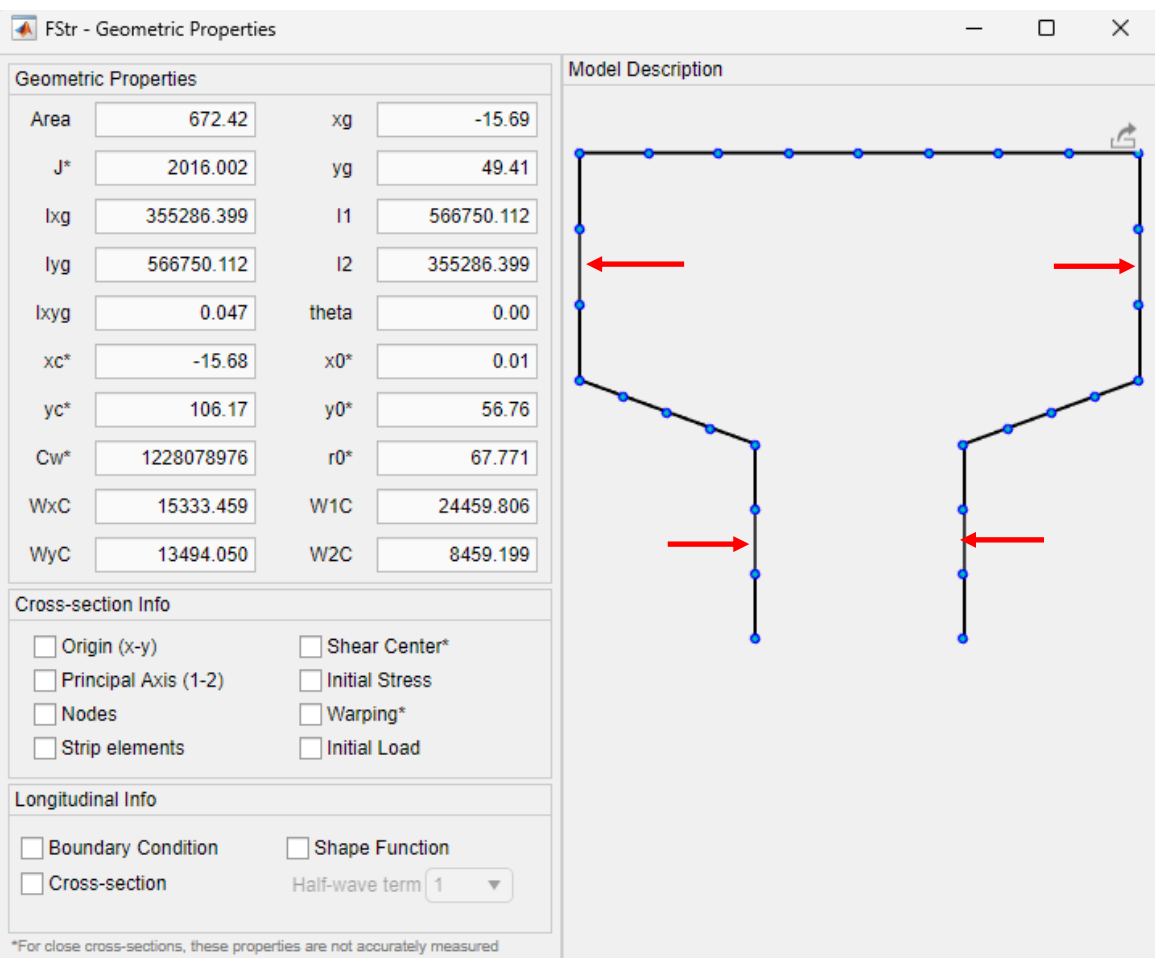
Momento Fletor e Esforço Cortante combinados (Sem enrijecedores)

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,00 \quad \left(\frac{46,87}{335,55}\right)^2 + \left(\frac{1,25}{48,50}\right)^2 = 0,02 < 1,00 \text{ OK!}$$

Momento Fletor e esforços axiais combinados

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1,00 \quad \frac{60,7}{118} + \frac{46,87}{335,55} = 0,65 < 1,00 \text{ OK!}$$

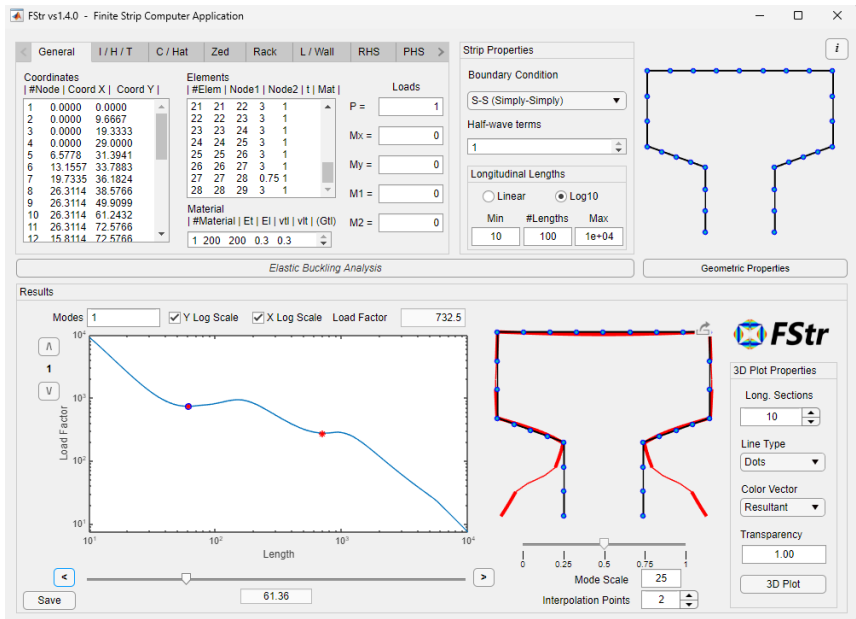
Seção B (Resistência à compressão)



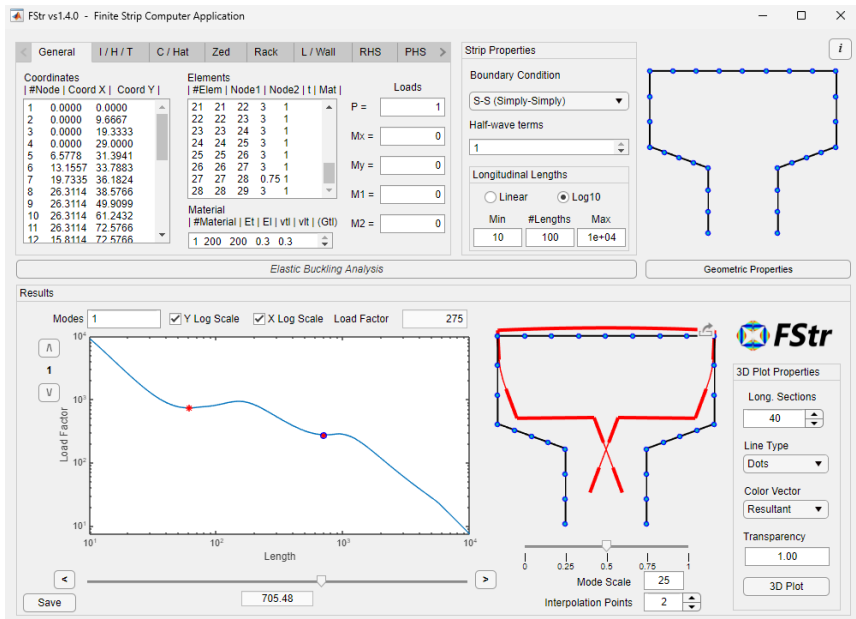
Para obter as propriedades geométricas, nos segmentos indicados foi adotado $t = 0,01\text{mm}$

Para análise elástica da flambagem local e distorcional, adotaremos 25% da espessura do elemento ($0,75\text{mm}$)

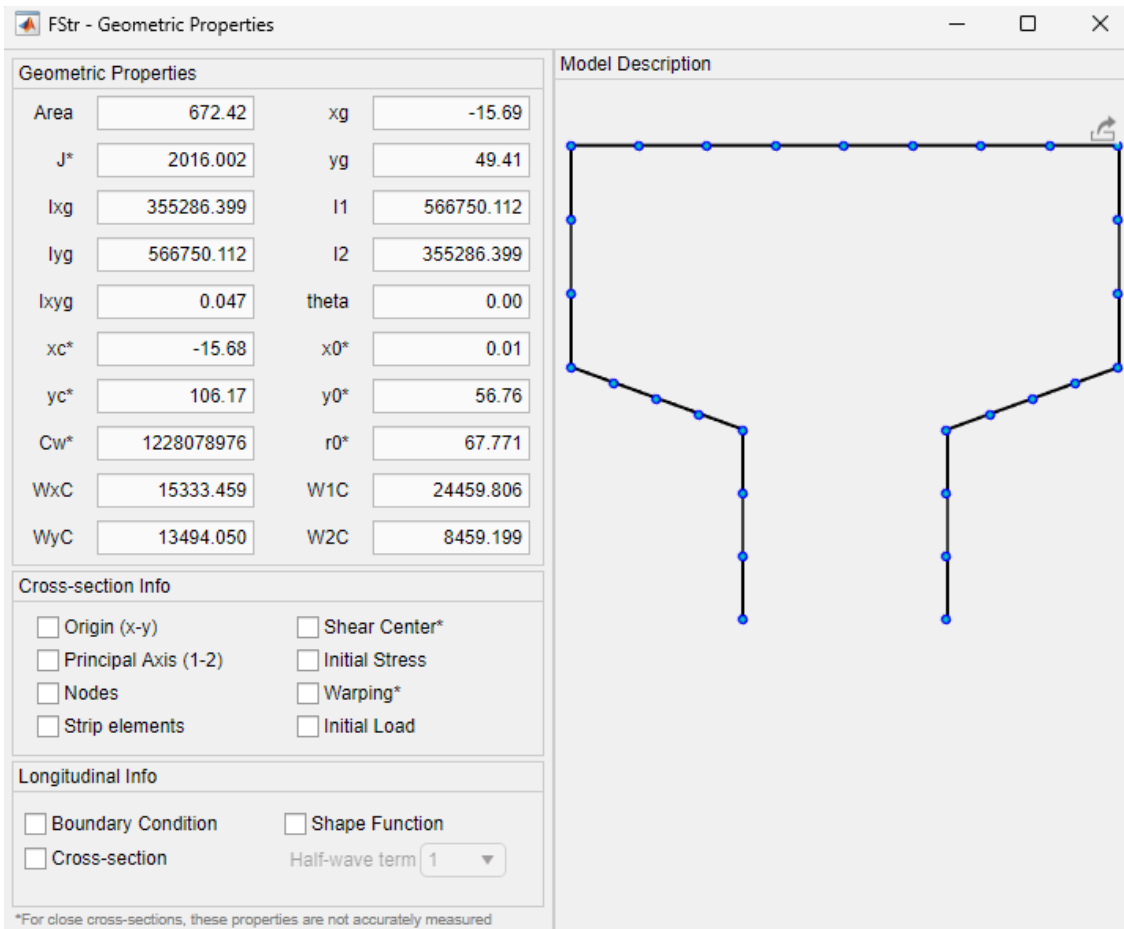
Carga Crítica Flambagem Local (732 kN)



Carga Crítica Flambagem Distorcional (275 kN)



Seção B (Resistência à compressão)



$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 35,5}{(1.150)^2} = 311,44 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 56,7}{(1.250)^2} = 179,07 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{6,7^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1228}{150^2} + 7700 \cdot 0,20 \right] = 274,30 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

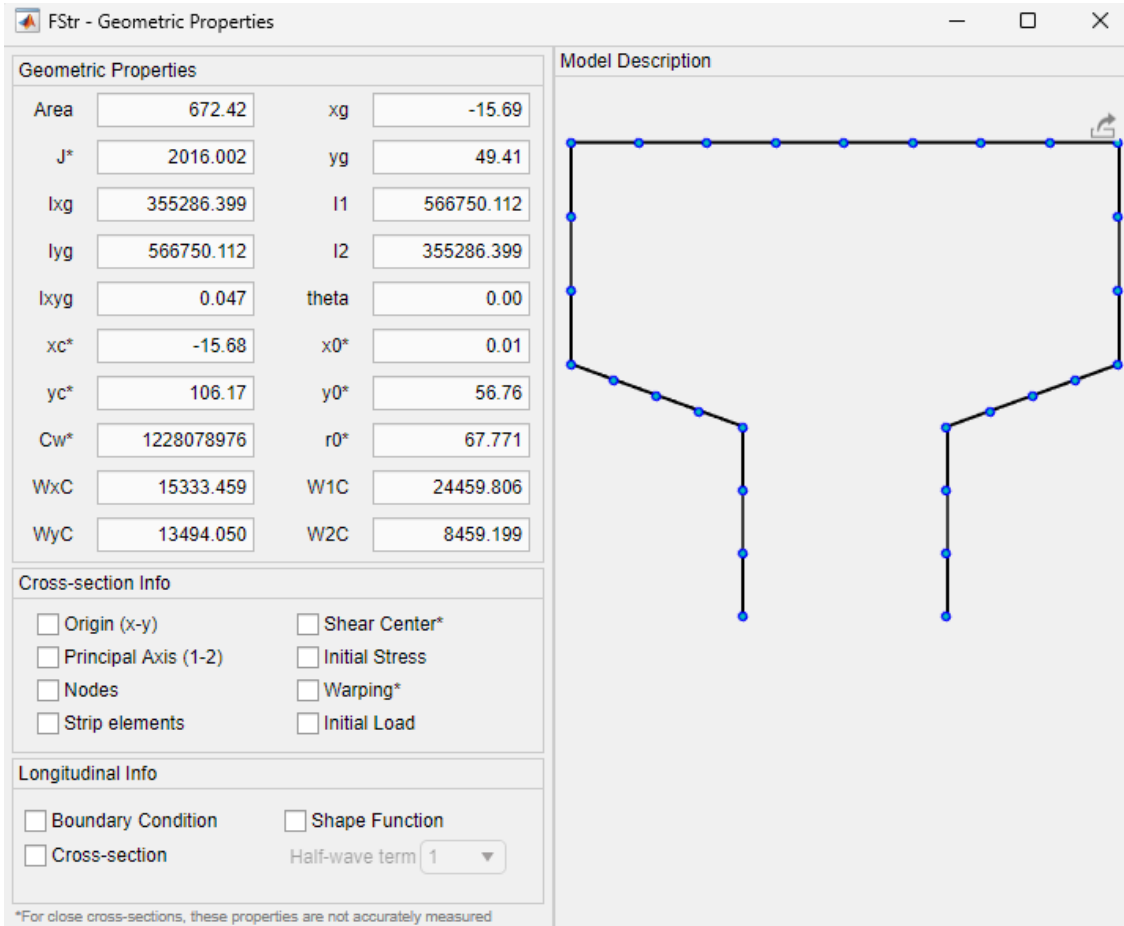
$$1 - \left(\frac{X_0}{r_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{5,67}{6,7} \right)^2 = 0,28$$

$$N_{Exz} = \frac{179,07 + 274,30}{2 \cdot 0,28} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 179,07 \cdot 274,30 \cdot 0,28}{(179,07 + 274,30)^2}} \right] = \mathbf{116,76}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{6,72 \cdot 24}{116,76}} = 1,17 < 1,5 \quad N_{cre} = (0,658^{1,17^2}) \cdot 6,72 \cdot 24 = 90,94 \text{ kN}$$

Seção A

Lx = 150cm, Ly = 250cm



Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{90,94}{732}} = 0,35$$

$$Se \lambda_l \leq 0,776 \quad N_{cRl} = N_{cre} = 90,94 \text{ kN}$$

Flambagem Distorcional

Carga Crítica para Flambagem Distorcional: 275 kN

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_{dist}}} \quad \lambda_{dist} = \sqrt{\frac{6,72 \cdot 24}{275}} = 0,766$$

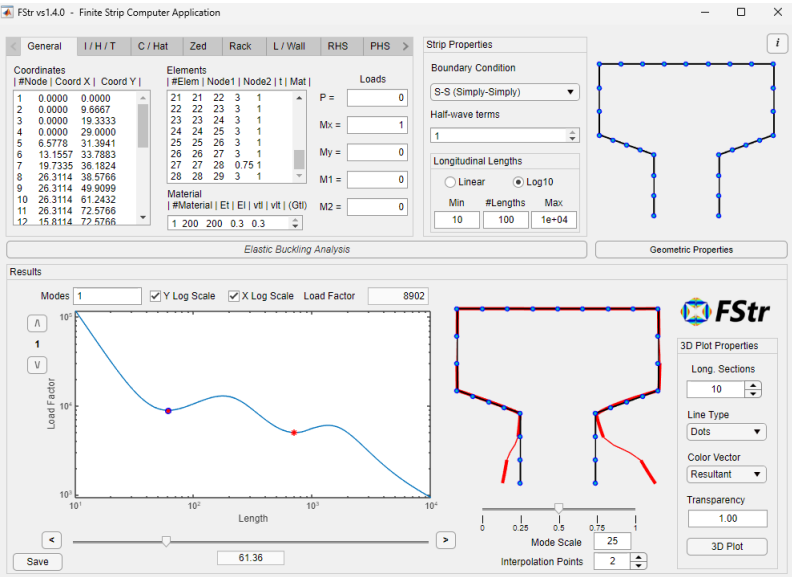
$$Se \lambda_{dist} > 0,561 \quad N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

$$N_{cRdist} = \left(1 - \frac{0,25}{0,766^{1,2}}\right) \cdot \frac{6,72 \cdot 24}{0,766^{1,2}} = 145,62 \text{ kN}$$

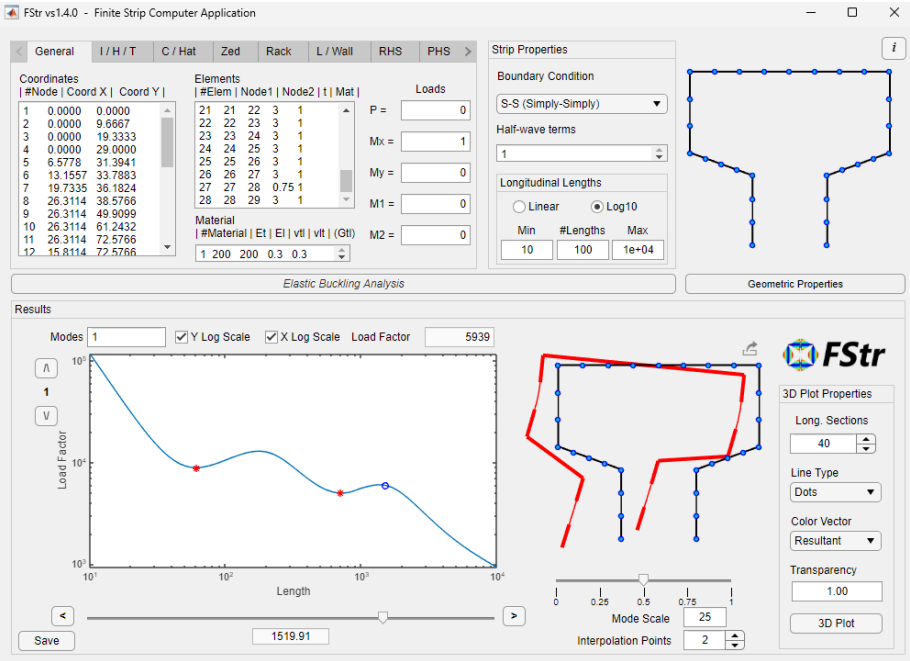
$$N_{CRd} = \frac{90,94}{1,2} = 75,78 \text{ kN}$$

Seção B (Resistência ao Momento Fletor)

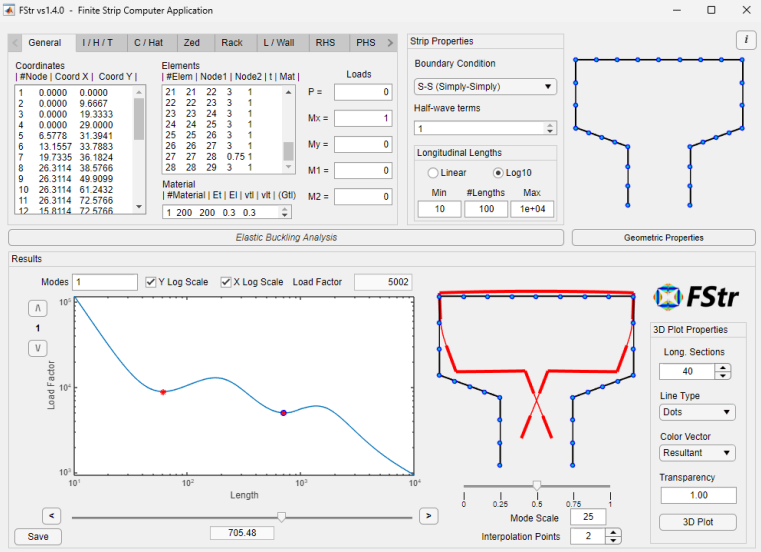
Momento Crítico para Flambagem Local (890 kN.cm)



Momento Crítico para FLT(593 kN.cm)



Momento Crítico para Flambagem Distorcional (500 kN.cm)



Seção B

Lx = 150cm, Ly = 250cm

Flambagem Lateral com Torção

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{15,33 \cdot 24}{593}} = 0,79$$

$$\text{Se } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$M_{Re} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot 0,79^2) 15,33 \cdot 24 = 337,53 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{337,53}{890}} = 0,615$$

$$\text{Se } \lambda_l \leq 0,776 \quad M_{Rl} = M_{Re} = 337,53 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{15,33 \cdot 24}{500}} = 0,857$$

$$\text{Se } \lambda_{dist} > 0,673 \quad N_{cRdist} = \left(1 - \frac{0,22}{0,857}\right) \cdot \frac{15,33 \cdot 24}{0,857} = 319,10 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{319,10}{1,2} = 265,91 \text{ kN.cm}$$

Seção B – Resistência ao Esforço cortante

Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por (adotando $\gamma = 1,1$):

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma}$$

$$\text{- Para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E}}{\gamma}$$

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma}$$

onde:

t é a espessura da alma; h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{34}{3} = 11,33$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \quad \lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{20000 \cdot 5}{24}} = 69,71$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot (2 \cdot 2,4 + 2 \cdot 1,9) \cdot 0,3 \cdot 24}{1,1} = 33,77 \text{ kN}$$

Seção B

Lx = 150cm, Ly = 250cm

Momento Fletor e Esforço Cortante combinados (Sem enrijecedores)

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,00 \quad \left(\frac{46,87}{265,91}\right)^2 + \left(\frac{1,25}{33,77}\right)^2 = 0,03 < 1,00 \text{ OK!}$$

Momento Fletor e esforços axiais combinados

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSD}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1,00 \quad \frac{60,7}{75,78} + \frac{46,87}{265,91} = 0,977 < 1,00 \text{ OK!}$$

Seção B (Resistência à compressão)

FStr - Geometric Properties

Geometric Properties

Area	735.21	xg	-15.69
J*	2205.000	yg	45.25
Ixg	383027.242	I1	656781.285
Iyg	656781.285	I2	383027.242
Ixyg	0.045	theta	0.00
xc*	-15.68	x0*	0.01
yc*	108.72	y0*	63.47
Cw*	1549695708	r0*	73.775
WxC	14017.358	W1C	24035.721
WyC	15637.649	W2C	9119.696

Cross-section Info

☐ Origin (x-y)
 ☐ Shear Center*

☐ Principal Axis (1-2)
 ☐ Initial Stress

☐ Nodes
 ☐ Warping*

☐ Strip elements
 ☐ Initial Load

Longitudinal Info

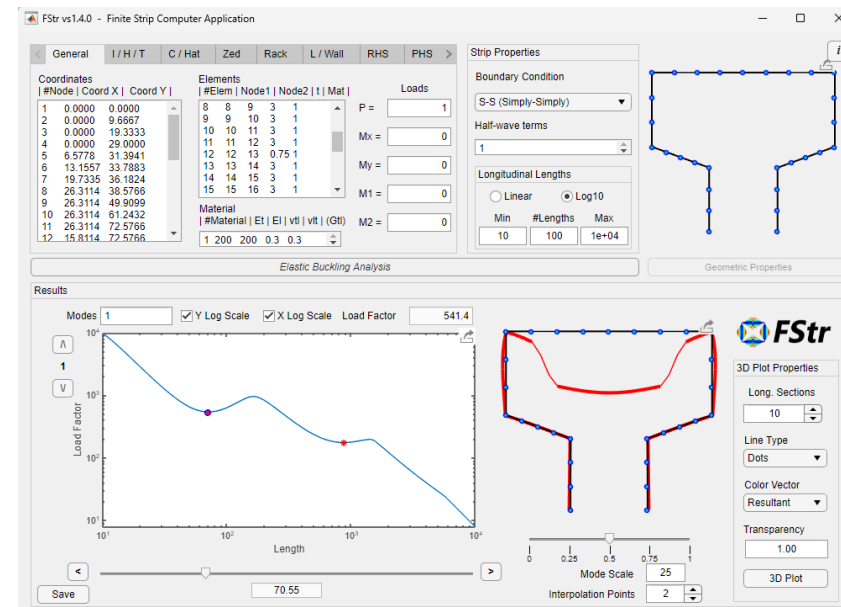
☐ Boundary Condition
 ☐ Shape Function

☐ Cross-section
 Half-wave term 1

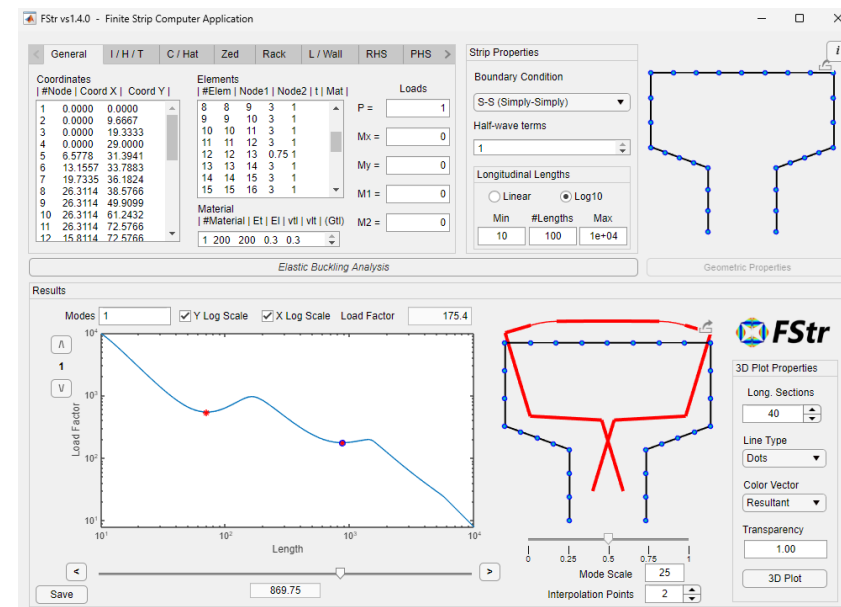
Model Description

*For close cross-sections, these properties are not accurately measured

Carga Crítica Flambagem Local (541 kN)



Carga Crítica Flambagem Distorcional (175,40 kN)



Para obter as propriedades geométricas, nos segmentos indicados foi adotado $t = 0,01\text{mm}$

Para análise elástica da flambagem local e distorcional, adotaremos 25% da espessura do elemento (0,75mm)

Seção B (Resistência à compressão)

FStr - Geometric Properties

Geometric Properties

Area	735.21	xg	-15.69
J*	2205.000	yg	45.25
I _{xg}	383027.242	I ₁	656781.285
I _{yg}	656781.285	I ₂	383027.242
I _{xg} y _g	0.045	theta	0.00
xc*	-15.68	x0*	0.01
yc*	108.72	y0*	63.47
C _w *	1549695708	r0*	73.775
W _x C	14017.358	W ₁ C	24035.721
W _y C	15637.649	W ₂ C	9119.696

Cross-section Info

<input type="checkbox"/> Origin (x-y)	<input type="checkbox"/> Shear Center*
<input type="checkbox"/> Principal Axis (1-2)	<input type="checkbox"/> Initial Stress
<input type="checkbox"/> Nodes	<input type="checkbox"/> Warping*
<input type="checkbox"/> Strip elements	<input type="checkbox"/> Initial Load

Longitudinal Info

<input type="checkbox"/> Boundary Condition	<input type="checkbox"/> Shape Function
<input type="checkbox"/> Cross-section	Half-wave term 1

*For close cross-sections, these properties are not accurately measured

Model Description

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(k_x \cdot L_x)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 38,30}{(1.150)^2} = 336 \text{ kN}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(k_y \cdot L_y)^2} \rightarrow \frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 65,67}{(1.250)^2} = 207,4 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{Ez} = \frac{1}{7,3^2} \left[\frac{\pi^2 \cdot 20000 \cdot 1549}{150^2} + 7700 \cdot 0,22 \right] = 287 \text{ kN}$$

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right]$$

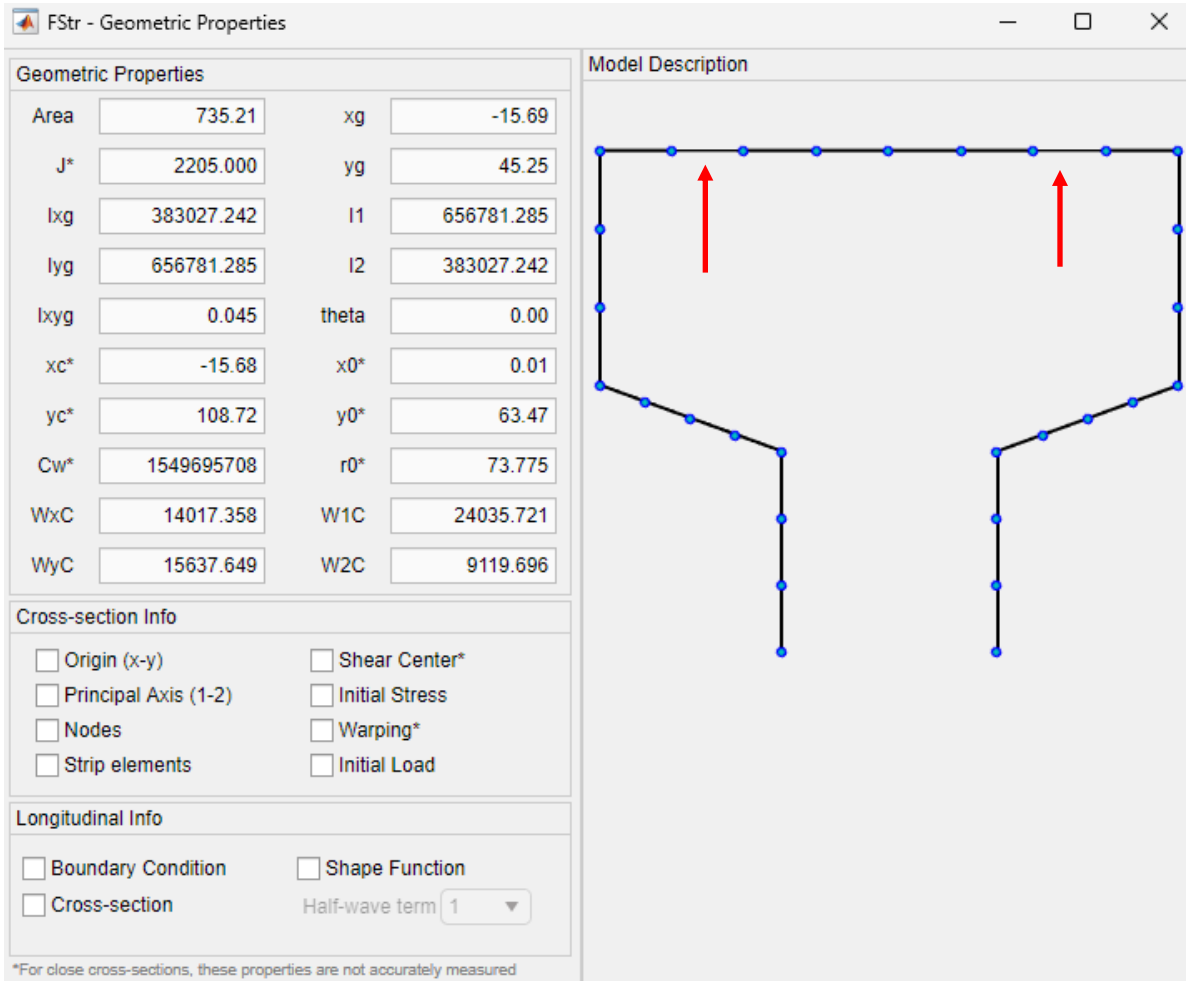
$$1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 = 1 - \left(\frac{6,35}{7,3} \right)^2 = 0,25$$

$$N_{Exz} = \frac{207,4 + 287}{2 \cdot 0,25} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 207,4 \cdot 287 \cdot 0,25}{(207,4 + 287)^2}} \right] = 129 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{7,35 \cdot 24}{129}} = 1,17 < 1,5 \quad N_{cre} = (0,658^{1,17^2}) \cdot 7,35 \cdot 24 = 99,46 \text{ kN}$$

Seção A

Lx = 150cm, Ly = 250cm



Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{99,46}{541}} = 0,43$$

$$Se \lambda_l \leq 0,776 \quad N_{cRl} = N_{cRe} = 99,46 \text{ kN}$$

Flambagem Distorcional

Carga Crítica para Flambagem Distorcional: 175,40 kN

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{A \cdot F_y}{N_{dist}}} \quad \lambda_{dist} = \sqrt{\frac{7,35 \cdot 24}{175,40}} = 1,00$$

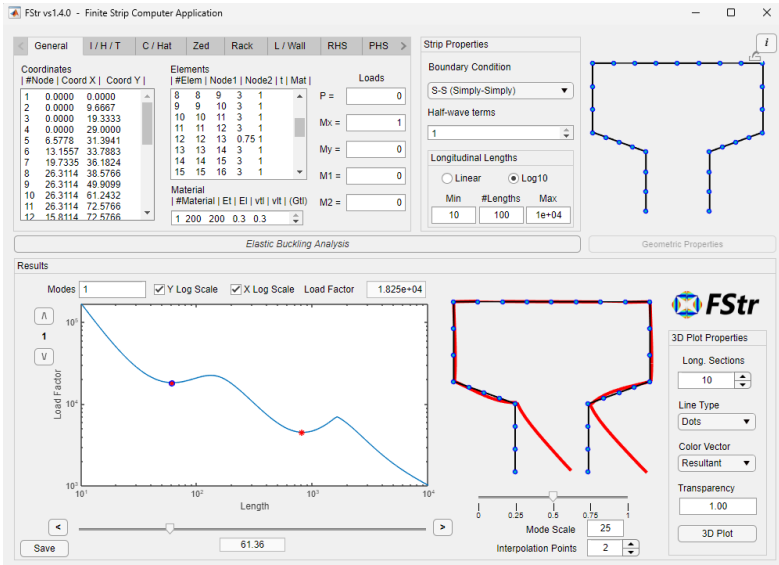
$$Se \lambda_{dist} > 0,561 \quad N_{c,Rdist} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_{dist}^{1,2}}\right) \frac{A f_y}{\lambda_{dist}^{1,2}}$$

$$N_{cRdist} = \left(1 - \frac{0,25}{1,00^{1,2}}\right) \cdot \frac{7,35 \cdot 24}{1,00^{1,2}} = 132,3 \text{ kN}$$

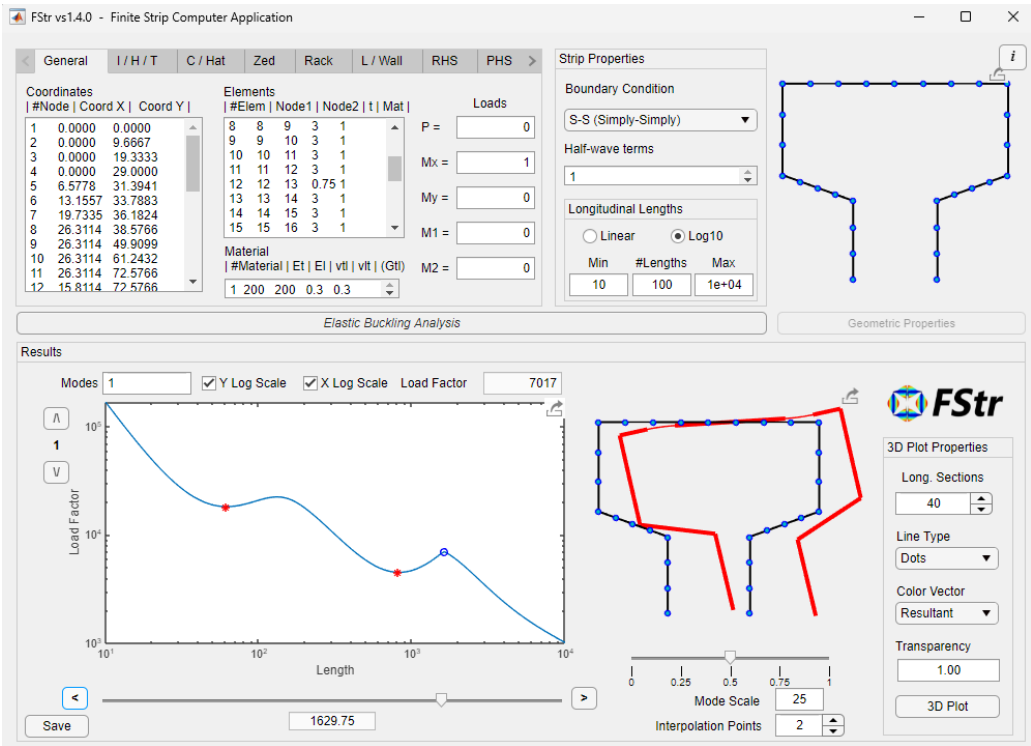
$$N_{CRd} = \frac{99,46}{1,2} = 82,90 \text{ kN}$$

Seção B (Resistência ao Momento Fletor)

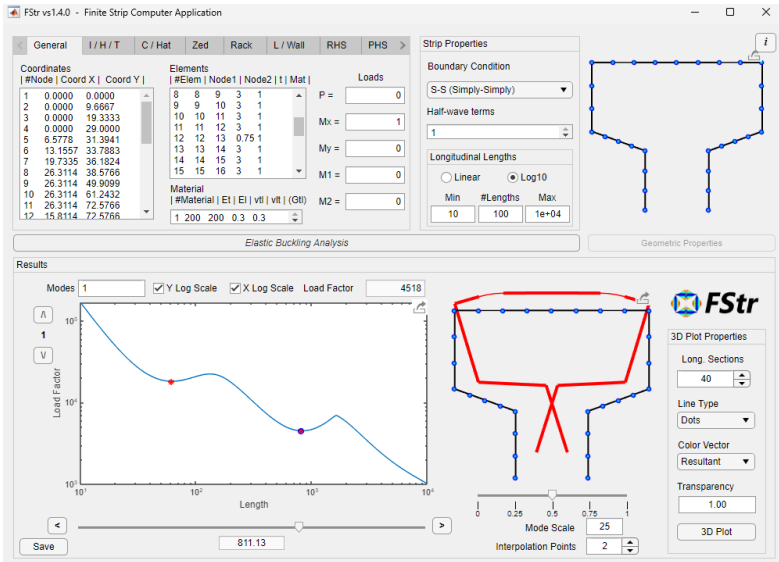
Momento Crítico para Flambagem Local (1825 kN.cm)



Momento Crítico para FLT(702 kN.cm)



Momento Crítico para Flambagem Distorcional (452 kN.cm)



Seção B

Lx = 150cm, Ly = 250cm

Flambagem Lateral com Torção

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_e}} = \sqrt{\frac{14,02 \cdot 24}{702}} = 0,69$$

$$\text{Se } 0,6 < \lambda_0 < 1,336$$

$$M_{Re} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot 0,69^2) 15,33 \cdot 24 = 354,3 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Local

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{354,3}{1825}} = 0,44$$

$$\text{Se } \lambda_l \leq 0,776 \quad M_{Rl} = M_{Re} = 354,3 \text{ kN.cm}$$

Flambagem Distorcional

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{14,02 \cdot 24}{702}} = 0,692$$

$$\text{Se } \lambda_{dist} > 0,673 \quad N_{cRdist} = \left(1 - \frac{0,22}{0,692}\right) \cdot \frac{14,02 \cdot 24}{0,692} = 331,65 \text{ kN.cm}$$

$$M_{Rd} = \frac{331,65}{1,2} = 276,38 \text{ kN.cm}$$

Seção C – Resistência ao Esforço cortante

Força cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada por (adotando $\gamma = 1,1$):

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \leq 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,6 f_y h t}{\gamma}$$

$$\text{- Para } 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} < \frac{h}{t} < 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,65 t^2 \sqrt{k_v f_y E}}{\gamma}$$

$$\text{- Para } \frac{h}{t} \geq 1,4 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}} \quad ; \quad V_{Rd} = \frac{0,905 E k_v t^3 / h}{\gamma}$$

onde:

t é a espessura da alma; h é a largura da alma (altura da parte plana da alma);

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado por:

- para alma sem enrijecedores transversais ou para $a/h > 3$:

$$k_v = 5,00$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{34}{3} = 11,33$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \quad \lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{20000 \cdot 5}{24}} = 69,71$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 \cdot (2 \cdot 3,4 + 2 \cdot 2,9) \cdot 0,3 \cdot 24}{1,1} = 49,50 \text{ kN}$$

Seção B

Lx = 150cm, Ly = 250cm

Momento Fletor e Esforço Cortante combinados (Sem enrijecedores)

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,00 \quad \left(\frac{46,87}{276,38}\right)^2 + \left(\frac{1,25}{49,50}\right)^2 = 0,03 < 1,00 \text{ OK!}$$

Momento Fletor e esforços axiais combinados

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1,00 \quad \frac{60,7}{82,90} + \frac{46,87}{276,38} = 0,90 < 1,00 \text{ OK!}$$