

DIMENSIONAMENTO DE PORTICO INDUSTRIAL METÁLICO

Luís Pedro Almeida Quintal

*Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra -
Departamento de Engenharia Civil*

SUMÁRIO

Após a elaboração do pré-dimensionamento do pórtico industrial com um vão entre colunas de 30 metros apresenta-se a formulação e respectiva aplicação no cálculo de dimensionamento com uma análise plástica global.

1. INTRODUÇÃO

Pretende-se o dimensionamento de um pórtico industrial segundo uma análise plástica e todas as suas implicações inerentes.

Este estudo teve como ferramenta de cálculo automático o programa TDV-RM 2004, neste foram obtidos os esforços do cálculo elástico, efeitos de 2ª ordem, cálculo plástico, bem assim como modos críticos de encurvadura e respectivas deformadas.

De referir que alguns dados obtidos serão confrontados com expressões teóricas internacionalmente aceites, constando algumas na descrição do EC3.

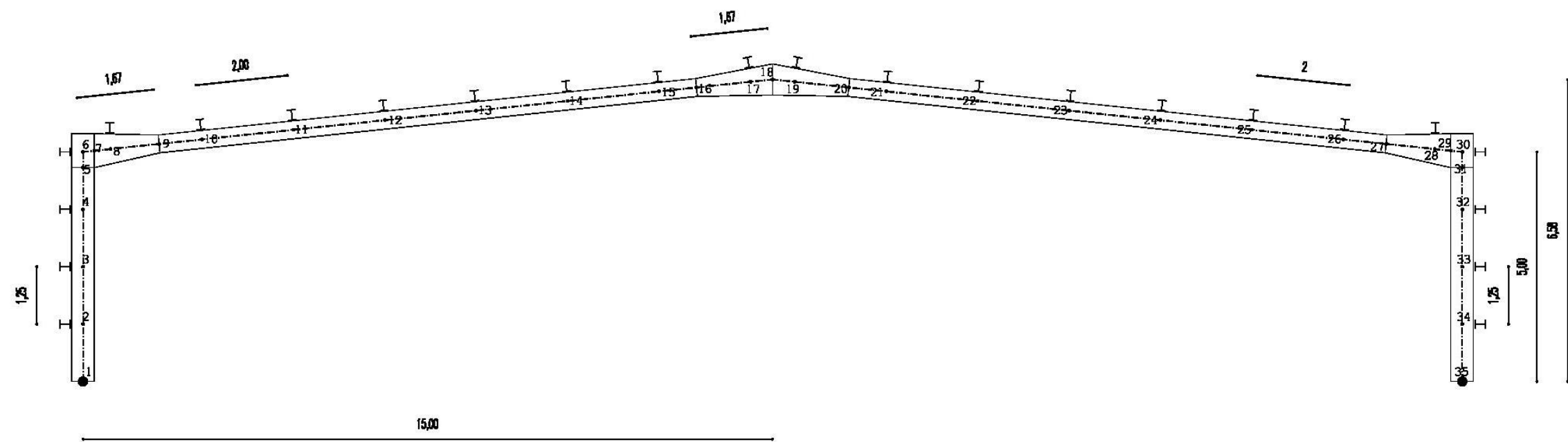
Todas as verificações para as secções escolhidas serão elaboradas de acordo com EN 1993-1-1.

Este estudo foi precedido do pré-dimensionamento, relatado no trabalho 1.

2. GEOMETRIA

O pórtico em causa com uma pendente nas águas de 6° e um vão de 30 metros entre colunas, sendo o afastamento entre pórticos de 9 metros, foi modelado conforme esquema da página seguinte, sendo que todos os resultados apresentados farão referência aos nós aí indicados. Os esquadros de reforços, quer ao nível da cumeeira, quer ao nível da ligação coluna travessa, foram assim modelados.

De referir, que os resultados serão apresentados em diagramas planificados. Os esforços serão apresentados segundo o eixo local do elemento e os deslocamentos segundo os eixos globais.

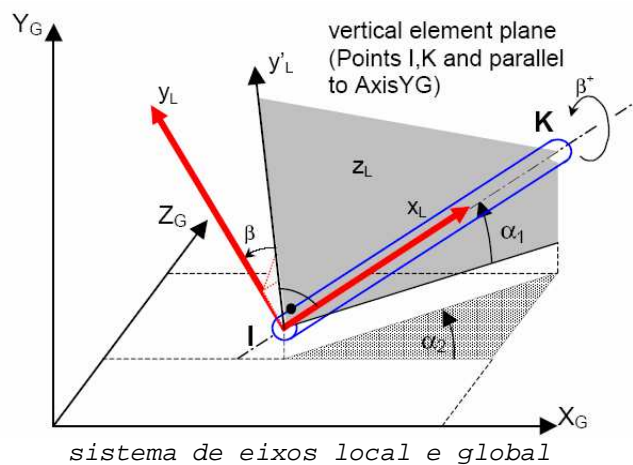


Dimensionamento de Pórtico Industrial

1:100

RM2004

Esquema de nós e elementos estruturais



3. CARGAS E COMBINAÇÕES

As cargas e combinações usadas foram as consideradas no pré-dimensionamento, tendo no entanto sido introduzidos alguns ajustes para aproximar os resultados da realidade. Cifram-se as alterações na consideração do peso próprio dos elementos estruturais coluna e travessa, quando no pré-dimensionamento estes estavam incluídos no valor das cargas permanentes e que se caracterizava por um valor de $0,25 \text{ KN/m}^2$. Este valor referido foi considerado no dimensionamento na sua totalidade como o valor do peso do revestimento da cobertura, madres e contraventamentos, sendo o mesmo considerado distribuído sobre o pórtico para não desvirtuar de sobremaneira o pré-dimensionamento efectuado além das considerações atrás referidas.

Assim,

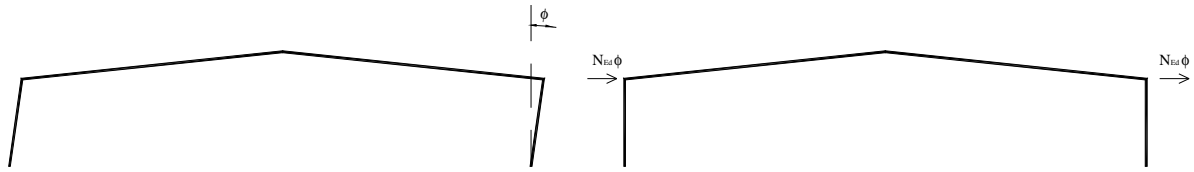
Peso próprio: $0,25 \text{ KN/m}^2$ + peso próprio do pórtico

Sobrecarga: $0,75 \text{ KN/m}^2$

Vento: $w_k = 0,90 \text{ KN/m}^2$

As combinações de acções foram as consideradas no pré-dimensionamento.

3.1 Forças Horizontais equivalentes às imperfeições da estrutura porticada



$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{5}} = 0,8944 \quad c / \quad h = 5,00$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + \frac{1}{m})} = \sqrt{0,5(1+1)} = 1 \quad c / \quad m = 1$$

$$\phi = 0,004472$$

para um esforço axial de 303,12 kN, temos

$$N_{eq} = N_{Ed} \cdot \phi = 1,36 \text{ kN}$$

4. ESTADOS LIMITES ULTIMOS

4.1 SECÇÕES DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO COLUNA IPE 550, TRAVESSA IPE 500

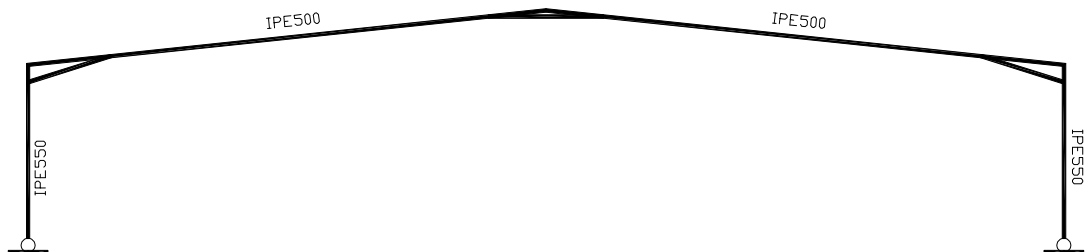


fig2 - esquema estrutural

Uma análise da estrutura proposta pelo pré-dimensionamento, através do programa TDV-RM2004, dará como será de esperar, pela alteração das cargas permanentes, um aumento de esforços, que não serão suportados pelas características mecânicas das secções, senão vejamos:

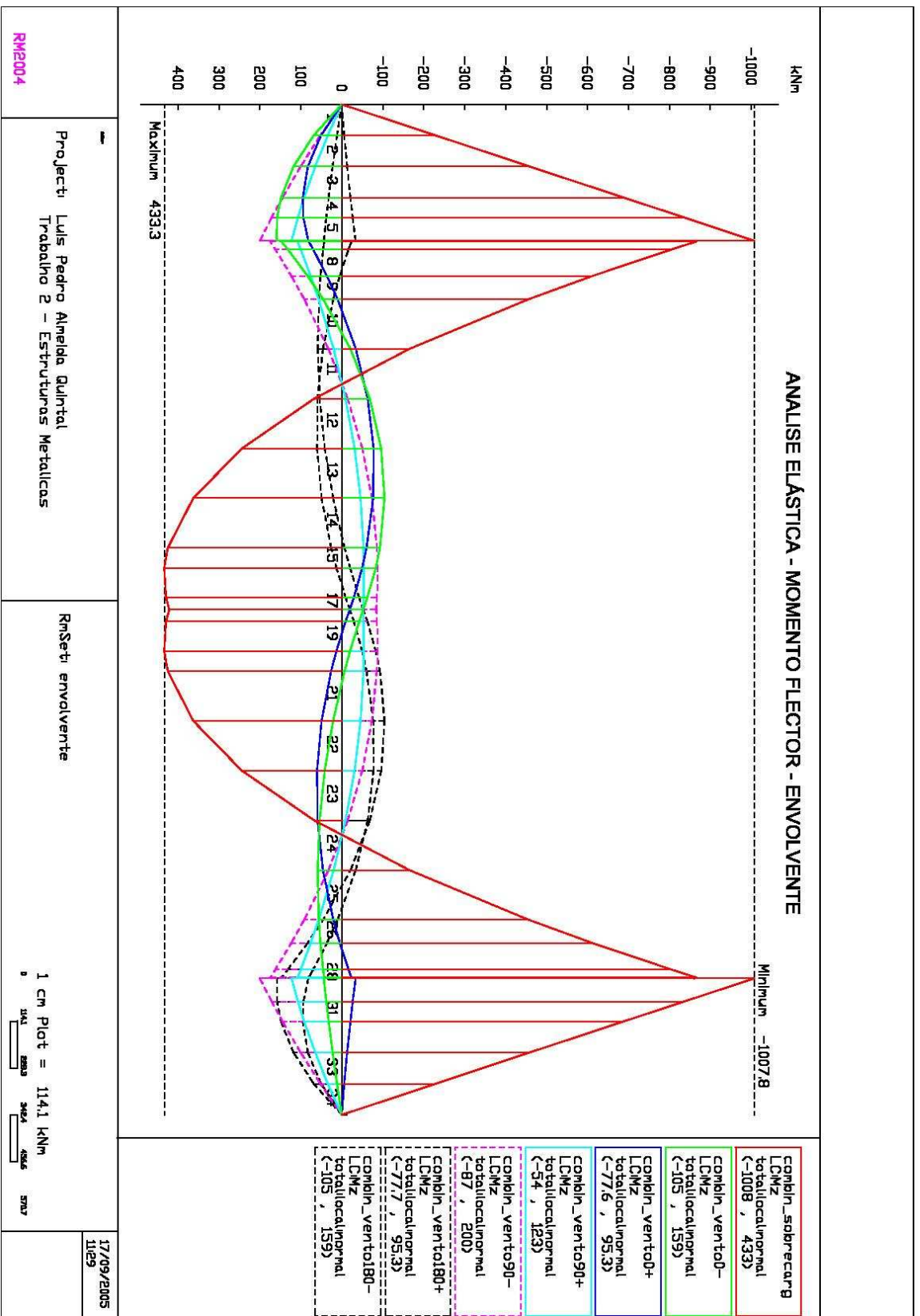
Os momentos plásticos das secções são:

IPE550:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2787E^{-6} \times 275E^3}{1,0} = 766,43 \text{ kN.m}$$

IPE500:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2194E^{-6} \times 275E^3}{1,0} = 603,35 \text{ kN.m}$$



Temos os seguintes esforços elásticos máximos na travessa e na coluna, excluindo esquadros de reforços

	Coluna nó 5, nó 31	Travessa nó 9, nó 27
M_z (KN.m)	-834,95	-611,59
N (KN)	-227,70	-119,14
V (KN)	179,90	173,30

O que comparando com o momento plástico máximo permitido pelas secções ultrapassam os mesmos.

Se pretendêssemos fazer uma análise plástica da estrutura teríamos a necessidade de formação de pelo menos 4 rótulas plásticas, o que para a presente estrutura que tem um grau de hiperestaticidade de 1, atingindo o colapso com 2 rótulas plásticas, não seria possível.

Teoricamente as quatro rótulas aconteceriam para os seguintes factores de carga na combinação acção base sobrecarga que é notoriamente a condicionante.

α_g	M_{pl}	Nó
0,918	766,43	5, 31
$\approx 0,986$	603,35	9, 27

Para um factor de carga de 0,918 já teríamos o colapso, pois já teríamos formadas simultaneamente as 2 rótulas plásticas necessárias.

Por ultimo referir, mais uma vez, que este factor de carga só é inferior a 1, porque no dimensionamento foi ajustado o valor da carga permanente, o que a não acontecer e mantendo os elementos do pré-dimensionamento teríamos com certeza um valor superior. De qualquer modo e como a estrutura é simétrica e o carregamento para a combinação de acção dimensionante também é simétrico as duas rótulas ocorreriam simultaneamente, pelo que a estrutura nunca sairia do regime elástico até atingir o colapso, à luz do que foi explanado no pré-dimensionamento.

4.2 COLUNA HEA 500, TRAVESSA HEA 400

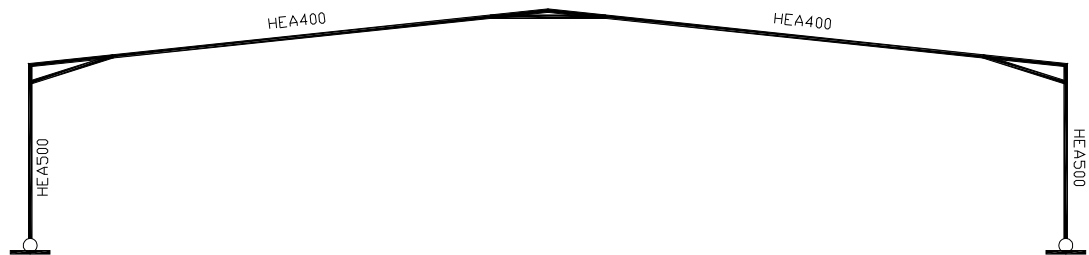


fig3 - esquema estrutural

Assim, e não verificadas as secções do pré-dimensionamento, alteraram-se as mesmas para HEA500, no caso das colunas e HEA400 no caso das travessas.

Esta estrutura porticada sujeita às combinações determinadas, apresenta para uma análise elástica linear de 1ª ordem os diagramas de esforços e deslocamentos que se encontram nas páginas seguintes.

4.2.1 Estabilidade Estrutural do pórtico

EN 1993-1-1

5.2

Efeitos relativos à deformada da estrutura

Considerando que $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}}$,

onde

α_{cr} é o factor de carga que provoca instabilidade elástica no modo global

F_{Ed} é o esforço actuante na estrutura

F_{cr} é o valor do esforço crítico que provoca encurvadura em instabilidade global baseado na rigidez elástica inicial.

Assim, e para uma análise elástica se $\alpha_{cr} < 10$ teremos de ter em conta os efeitos de 2ª ordem provocados pela deformação da estrutura.

Para verificar tal, vamos fazer uma primeira aproximação, usando a expressão 5.2 do Eurocódigo 3 que estabelece que para pórticos de águas inclinadas com pendente reduzida o valor de α_{cr} pode ser dado pela expressão:

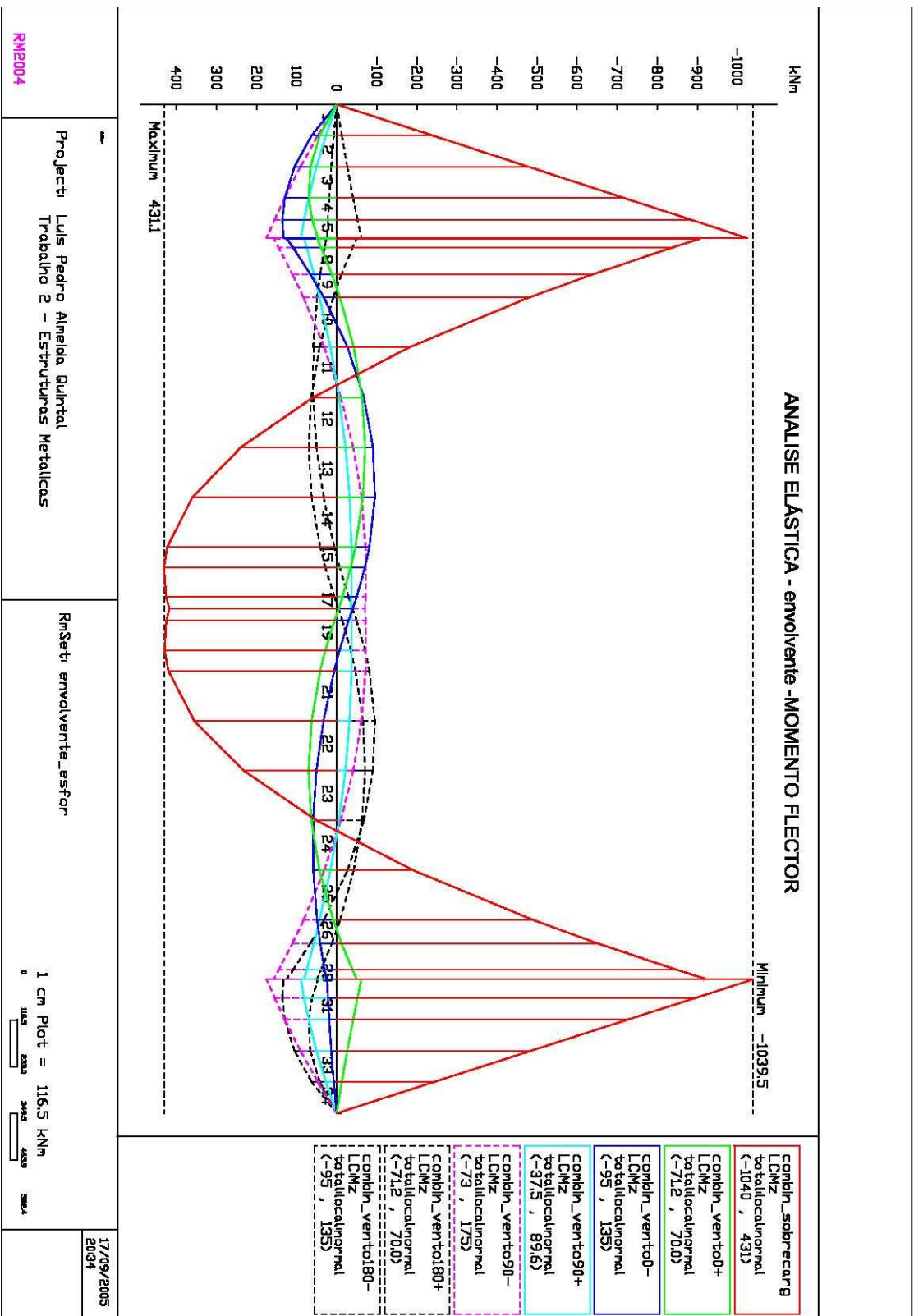
$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)$$

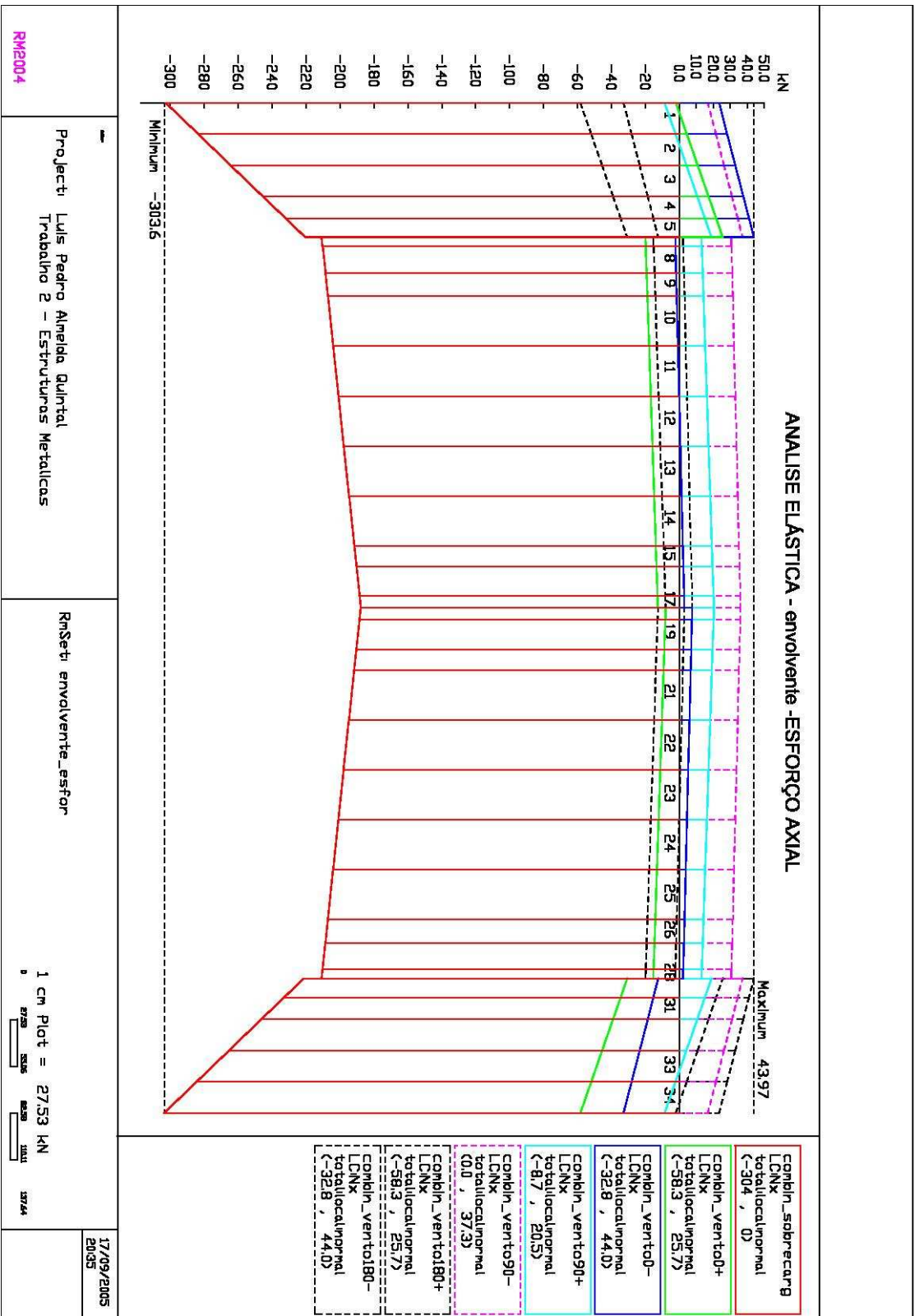
onde

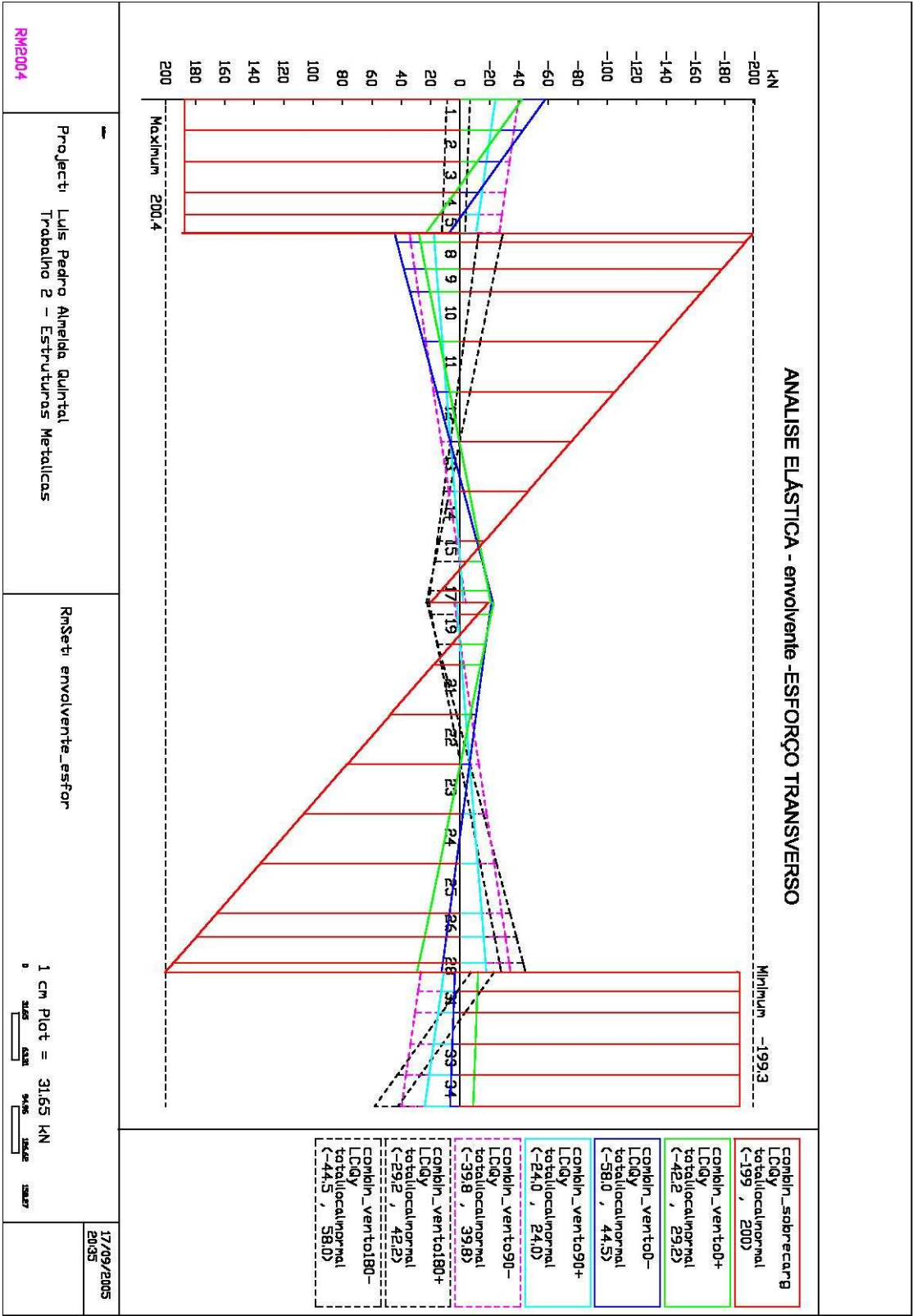
H_{Ed} é o valor das cargas horizontais

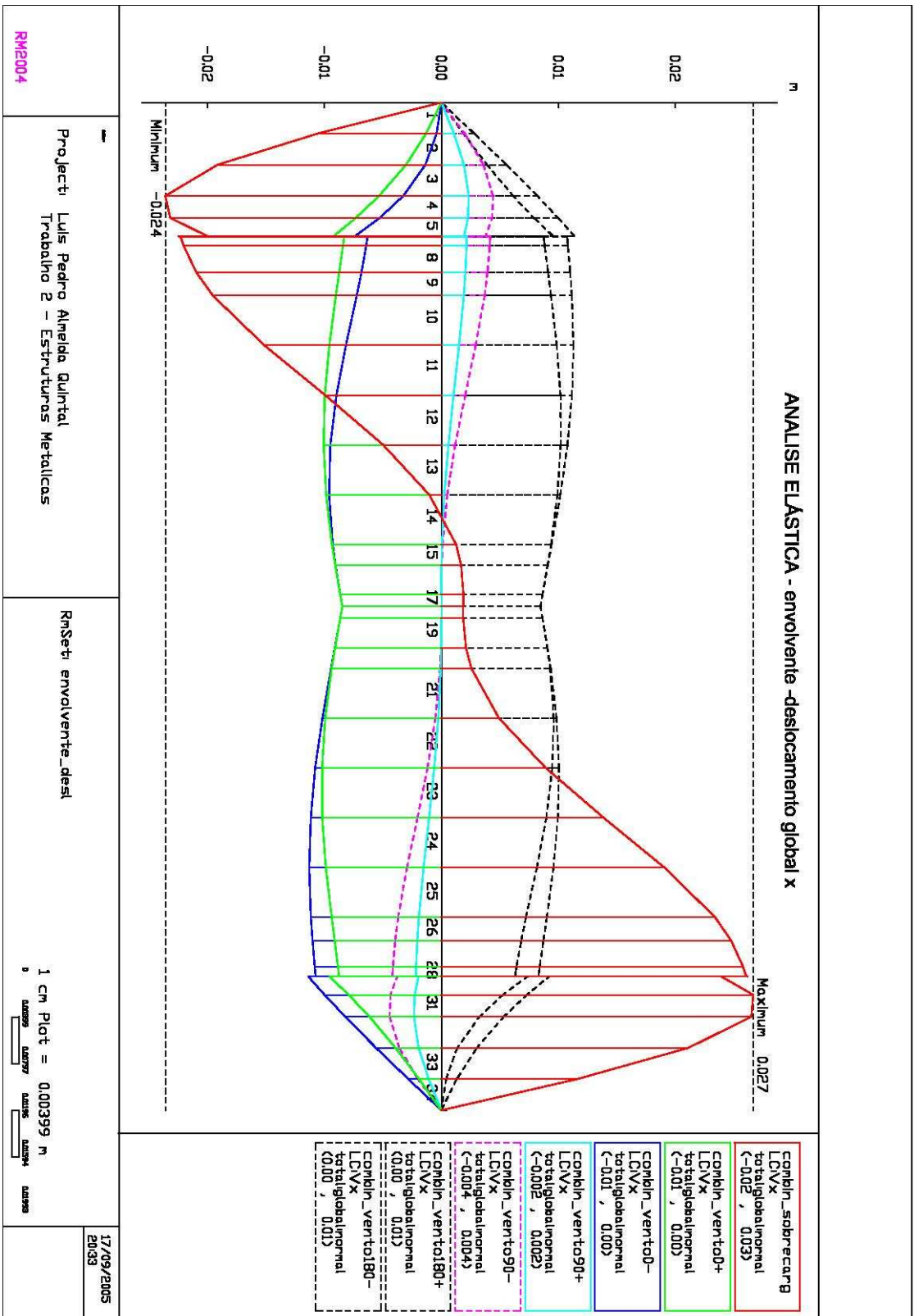
V_{Ed} é o valor total das cargas verticais na base das colunas

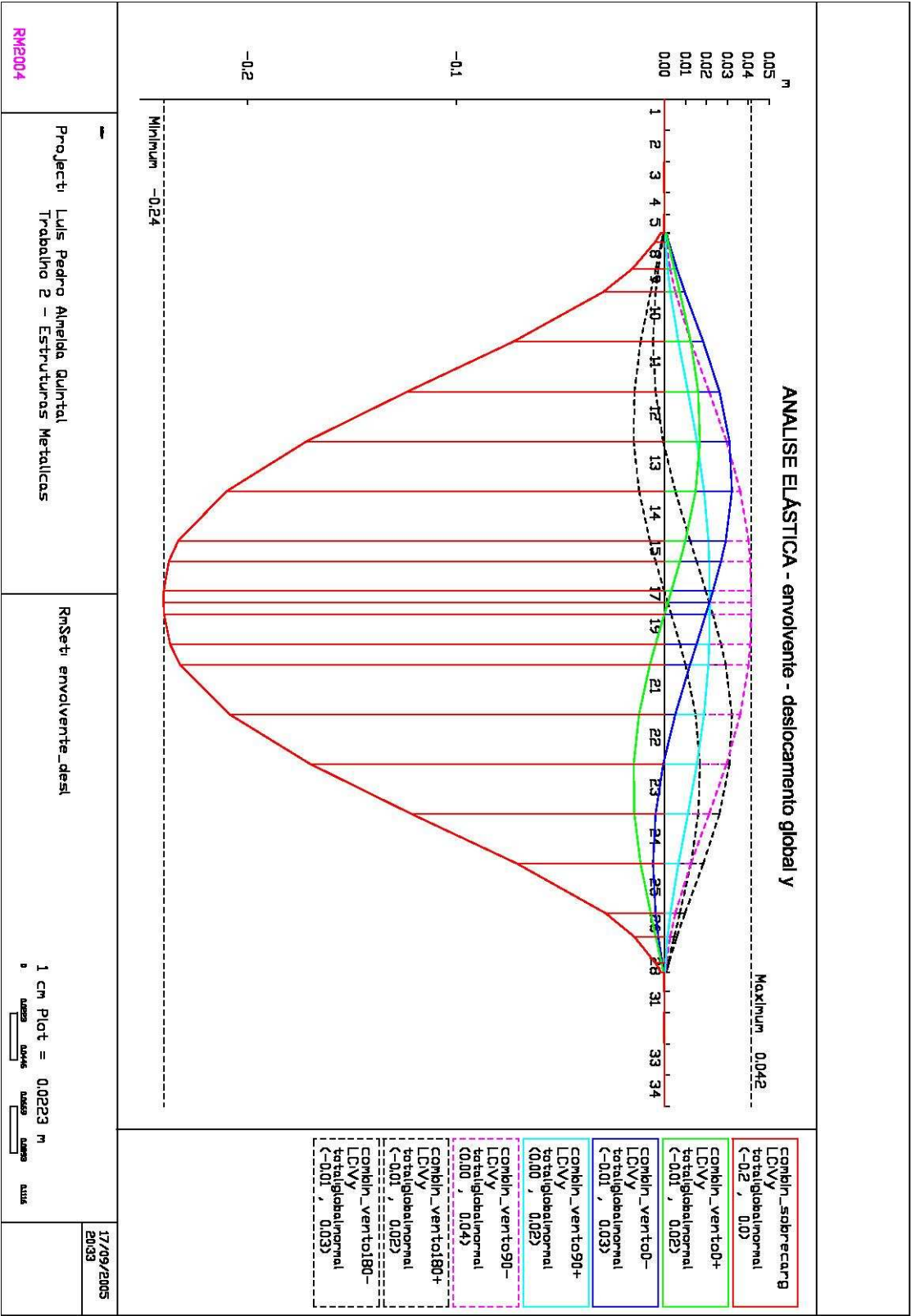
h é a altura do piso











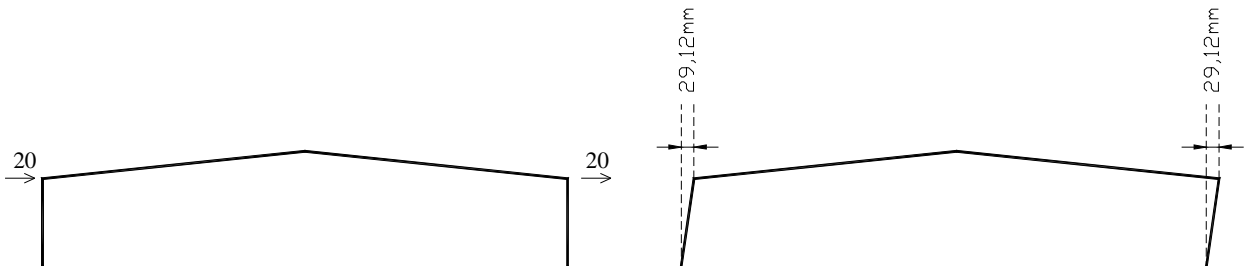
RM2004

$\delta_{H,Ed}$ é o deslocamento horizontal no topo do piso relativamente à base, quando a estrutura se encontra carregada com as cargas H_{Ed}

Para a combinação acção base sobrecarga temos na base dos dois pilares,

$$V_{Ed}=302,66+303,57=606,23 \text{ KN}$$

Para uma carga horizontal de 20 KN no topo de cada coluna temos os seguintes deslocamentos,



assim,

$$H_{Ed}=40 \text{ KN}$$

$$\delta_{H,Ed}=29,12 \text{ mm}$$

$$h=5000 \text{ mm}$$

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) = \left(\frac{40}{606,23} \right) \left(\frac{5000}{29,12} \right) = 11,32$$

no entanto, se a esbelteza adimensional calculada para a travessa ou viga for superior a $0,3 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} = 0,3 \sqrt{\frac{159 E^{-4} \times 275 E^3}{208,50}} = 1,37$ a expressão em causa não se torna válida.

Como se verá à frente o valor de $\bar{\lambda}$ para a presente é superior, pelo que a presente formula é aceitável para uma primeira aproximação.

De acordo com esta estimativa não seria então necessário ter em conta os efeitos de 2ª ordem.

De referir que os resultados apresentados não se encontram do lado da segurança.

Vamos e para uma segunda aproximação usar outro método aceite internacionalmente e com resultados interessantes.

Para este tipo de estruturas porticadas verdadeiramente rotuladas, temos a seguinte relação

$$\frac{V_{Ed}}{V_{cr}} = \left[\left(\frac{N_r}{N_{r,cr}} \right) + (4+3,3R) \left(\frac{N_c}{N_{c,cr}} \right) \right]$$

onde E é o módulo de Young =210GPa
 I_r é momento de inércia da travessa no plano do pórtico
 I_c é o momento de inércia da coluna no plano do pórtico
 s é o comprimento da travessa ao longo da pendente
 h é a altura da coluna
 N_c é esforço axial na coluna para uma análise elástica
 N_r é esforço axial na travessa para uma análise elástica

$$N_{c,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_c}{h^2} = \text{carga crítica de Euler para a coluna}$$

$$N_{r,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_r}{s^2} = \text{carga crítica de Euler para a travessa}$$

$$R = \frac{\text{rigidez da coluna}}{\text{rigidez da travessa}} = \frac{\left(\frac{I_c}{h}\right)}{\left(\frac{I_r}{s}\right)} = \frac{I_c \cdot s}{I_r \cdot h}$$

Então temos para a coluna **HEA500**

$$N_{c,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_c}{h^2} = \frac{\pi^2 \times 210E^6 \times 86970E^{-8}}{5^2} = 72102,2KN$$

$$I_c = 86970 \text{ cm}^3$$

$$h = 5,00 \text{ m}$$

$$V_{Ed} = 261KN \text{ (esforço axial a meio da coluna)}$$

para a coluna **HEA400**

$$N_{r,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_r}{s^2} = \frac{\pi^2 \times 210E^6 \times 45070E^{-8}}{15,08^2} = 4107,75KN$$

$$I_r = 45070 \text{ cm}^3$$

$$h = 15,08 \text{ m}$$

$$V_{Ed} = 208,50KN \text{ (esforço axial junto ao reforço da travessa)}$$

$$R = \frac{I_c \cdot s}{I_r \cdot h} = \frac{86970E^{-8} \times 15,08}{45070E^{-8} \times 5} = 5,82$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{cr}} = \left[\left(\frac{N_r}{N_{r,cr}} \right) + (4 + 3,3R) \left(\frac{N_c}{N_{c,cr}} \right) \right] = 0.13476$$

$$\alpha_{cr} = \frac{V_{cr}}{V_{Ed}} = \frac{1}{0.13476} = 7,42$$

Será de esperar que o valor apresentado por este método apresente um α_{cr} inferior ao real, pois não se teve em conta a inércia introduzida pelos reforços, ainda assim, temos uma aproximação conservativa do valor.

Destes dois métodos pode estimar que o primeiro modo crítico para a combinação sobrecarga se encontra no seguinte intervalo.

$$7,42 < \alpha_{cr} < 11,32.$$

Vamos de seguida comparar estes valores com os resultados obtidos através do programa TDV-RM2004 para as diversas combinações de acções

Combinações acção base	Método 1 $\alpha_{cr,1}$	Método 2 $\alpha_{cr,1}$	TDV-RM2004					
			$\alpha_{cr,1}$	$\alpha_{cr,2}$	$\alpha_{cr,3}$	$\alpha_{cr,4}$	$\alpha_{cr,5}$	$\alpha_{cr,6}$
Sobrecarga	11,32	7,42	9,060	26,424	48,824	78,763	111,879	156,231
			nó 24	nó 18	nó 23	nó 12	nó 11	nó 18
Vento 0° peso próprio desfavorável			131,169	396,196	710,319	1054,66	1409,28	2148,08
			nó 24	nó 20	nó 14	nó 24	Nó 22	Nó 24
Vento 0° peso próprio favorável			1595,83	5927,03	9254,71	13886,6	22892,2	37097,7
			Nó 15	Nó 15	Nó 27	Nó 26	Nó 26	Nó 12
Vento 90° peso próprio desfavorável			7671,32	41105,2	342236	349804	*****	*****
			Nó 26	Nó 34	Nó 1	Nó 35		
Vento 90° peso próprio favorável			*****	*****	*****	*****	*****	*****
Vento 180° peso próprio desfavorável			131,169	396,196	710,319	1054,66	1409,28	2148,08
			nó 12	nó 16	nó 22	nó 12	Nó 14	Nó 12
Vento 180° peso próprio favorável			1595,83	5927,03	9254,71	13886,6	22892,2	37097,7
			Nó 21	Nó 21	Nó 9	Nó 10	Nó 10	Nó 24

Podemos verificar que para a combinação de acção base sobrecarga completamente condicionante neste estudo o primeiro modo de encurvadura ocorre para $\alpha_{cr}=9,060$, o que à luz do Eurocódigo 3 implica a necessidade de calcular os efeitos de 2ª ordem. De referir que estamos perante uma estrutura com deslocamentos laterais conforme o confirma o α_{cr} do primeiro modo de encurvadura.

4.2.1.2 Cálculo de efeitos de 2ª ordem

Os efeitos de 2ª ordem que não poderão ser desprezados, pois o $\alpha_{cr}<10$ para uma análise linear terão em conta naturalmente os efeitos causados pela deformada do topo do piso em relação à base deste, vulgarmente designados pelo efeito P- Δ . Além destes há a considerar também os efeitos do afastamento da corda entre os pontos atrás referidos, estes são os efeitos P- δ , e não serão estudados directamente, porquanto os mesmos encontram-se

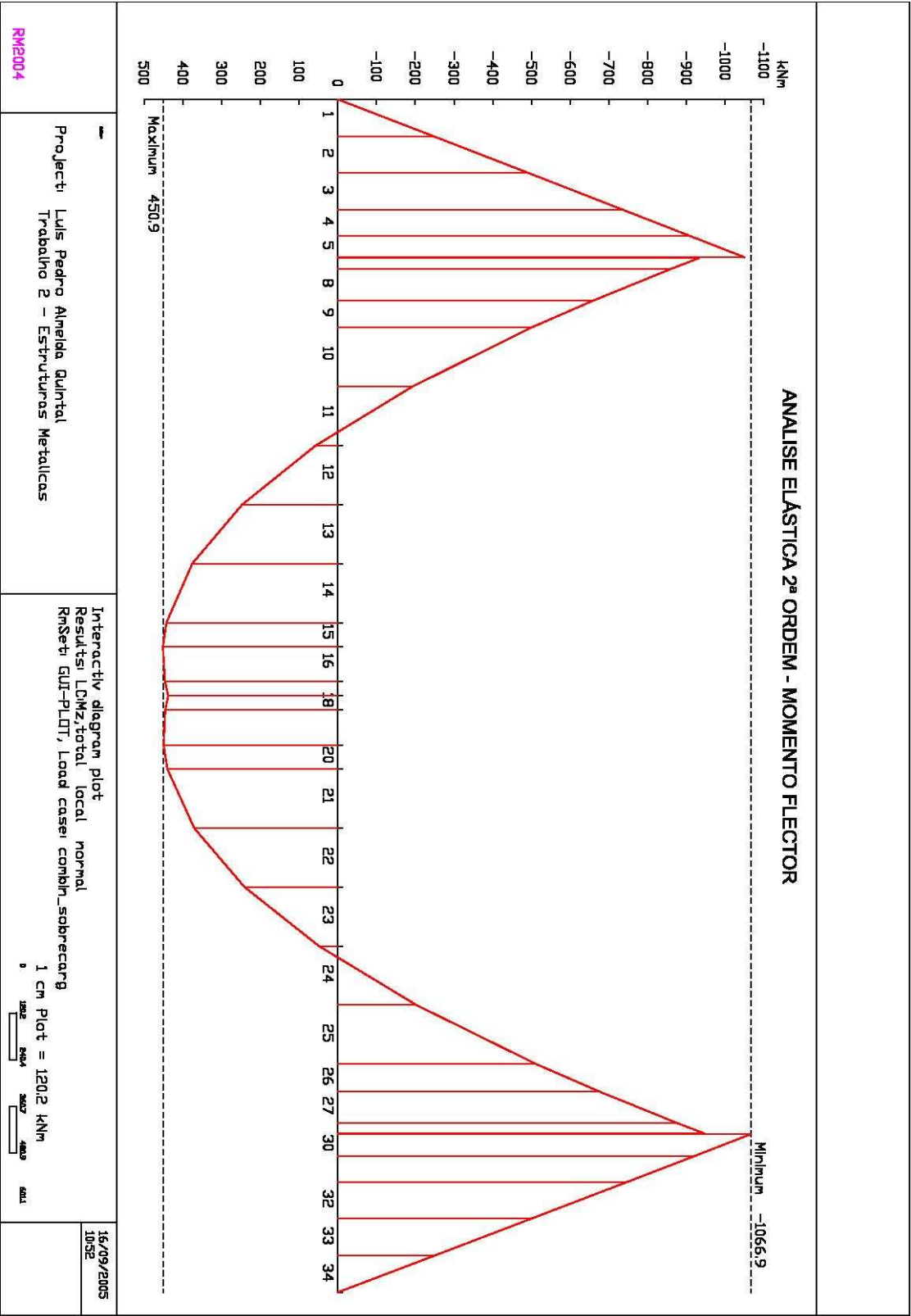
incorporados nas curvas de encurvadura utilizadas na verificação das secções pelo Eurocódigo 3.

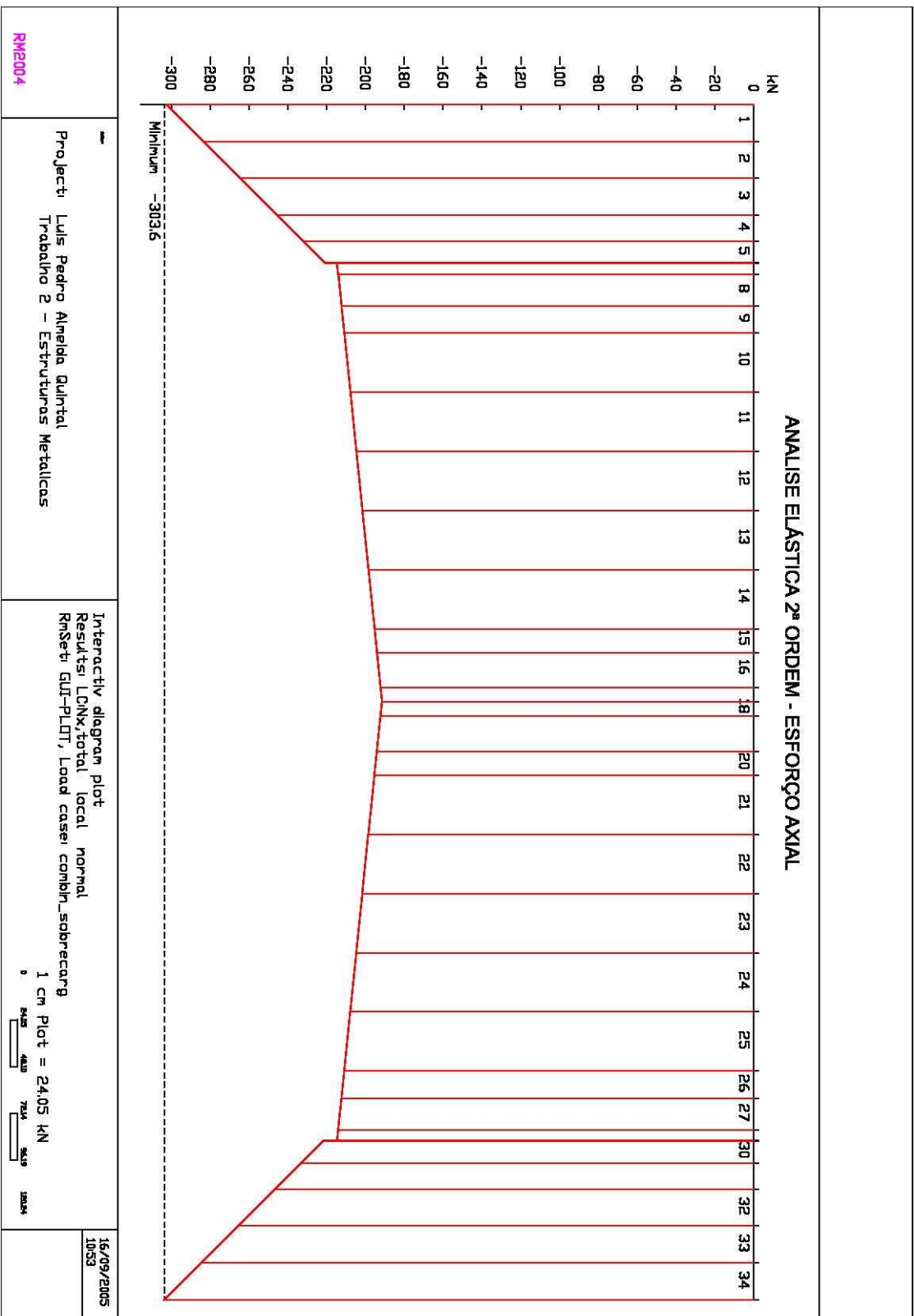
Estes efeitos serão calculados directamente através do método P-Δ com auxílio do programa de calculo automático referido.

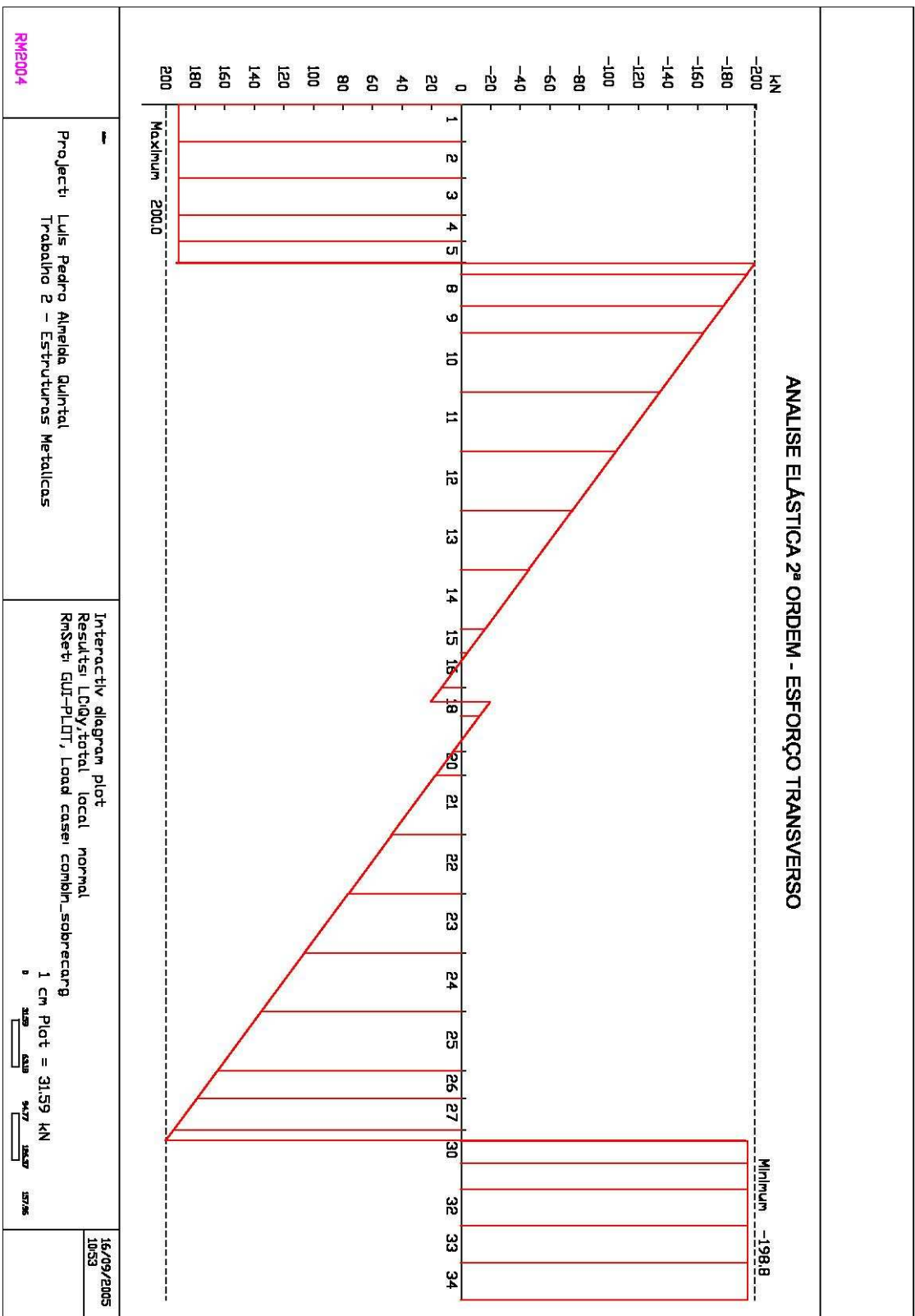
Uma análise de 2ª ordem explícita poderia ser efectuada com recurso ao método de amplificação dos momentos em que apenas as forças aplicadas na estrutura capazes de provocar deslocamentos relativos entre a base e o topo do elemento são multiplicadas por um factor dado por,

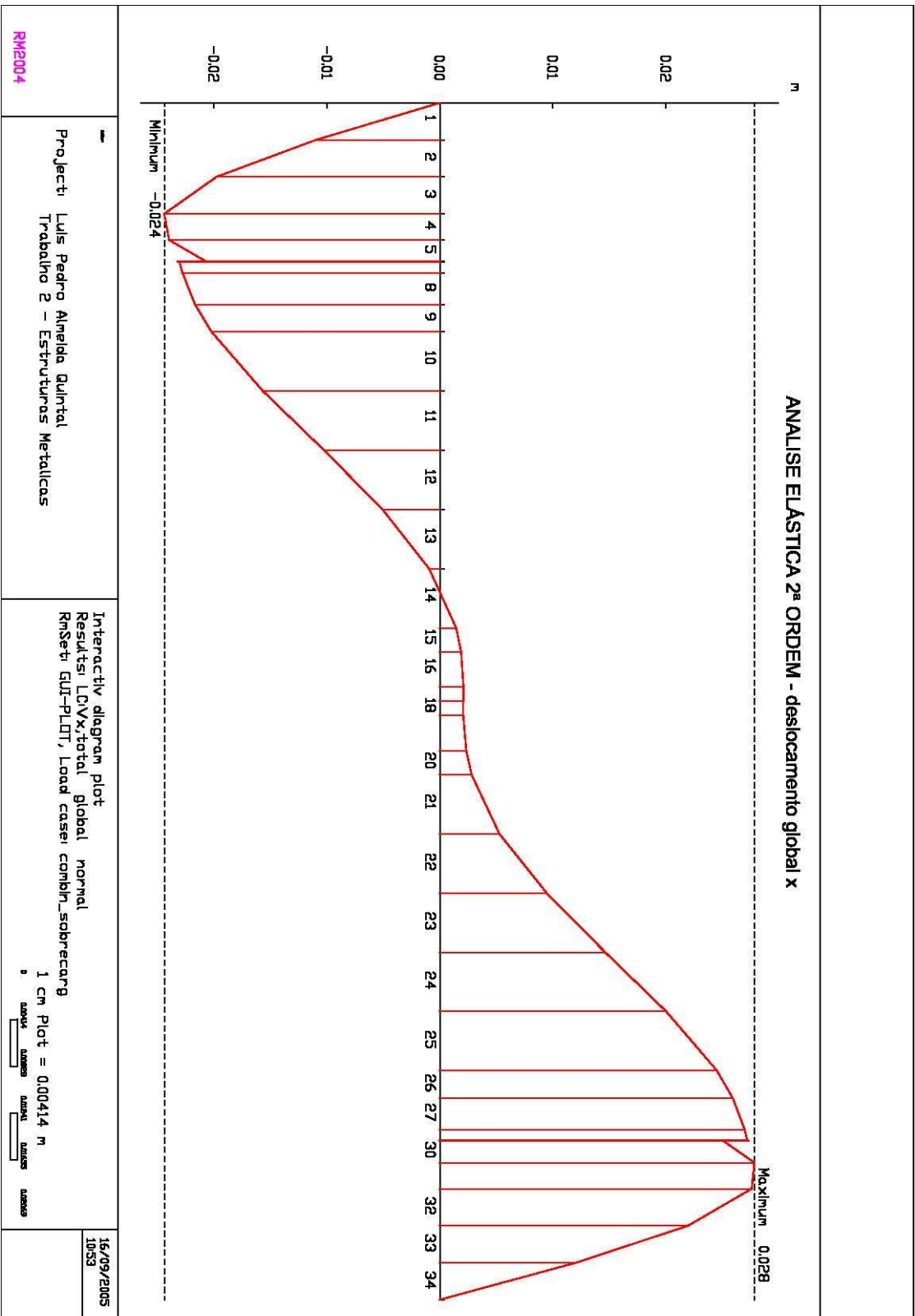
$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{9,060}} = 1,124$$

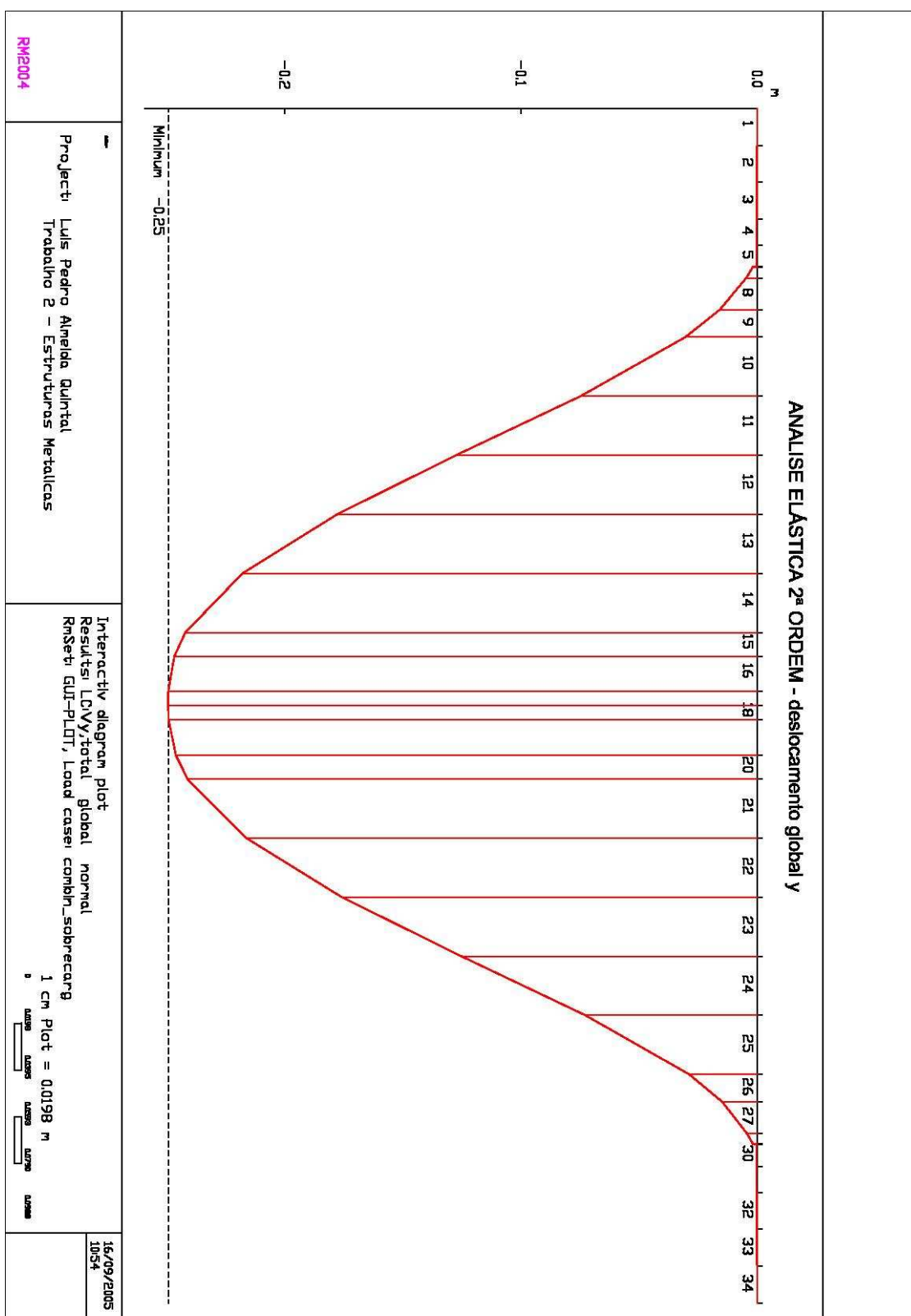
Da análise de 2ª ordem usando o método P-Δ obtiveram-se para a combinação base sobrecarga, que aliás é a única que impõe efeitos de 2ª ordem a considerar, os esforços e deslocamentos a seguir traduzidos em diagramas planificados.











4.2.2 ANÁLISE PLÁSTICA

Com a possibilidade de formação de rótulas plásticas por parte das secções quando atingem o limite da sua capacidade plástica, nomeadamente o momento plástico, calcular-se-á a estrutura porticada, tendo em conta que o número de rótulas plásticas máximo para a presente estrutura com grau de hiperstaticidade 1 será de duas rótulas, a partir da qual a estrutura entra em colapso.

Temos para a presente estrutura e para as secções em causa os seguintes momentos plásticos máximos,

Coluna - HEA500

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3949E^{-6} \times 275E^3}{1,0} = 1085,98KN$$

travessa - HEA400

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2562E^{-6} \times 275E^3}{1,0} = 704,55KN$$

o que representa que para a presente estrutura e analisando o diagrama de momentos elásticos dos elementos sem reforços verifica-se que nestes os momentos plásticos não são atingidos, pelo que não será formada qualquer rótula plástica, pelo que a estrutura se encontra em regime elástico.

O uso de secções inferiores para a coluna ou para a travessa, respectivamente HEA450 e HEA360, ainda que combinadas com as secções anteriores originam invariavelmente a formação de rótulas plásticas, no entanto e como já tinha sido aventado no estudo de pré-dimensionamento, para a combinação condicionante que é a combinação acção base sobrecarga verifica-se a formação das duas rótulas plásticas simultaneamente, o que na prática conduz a que o colapso se verifique para um factor de carga inferior a 1. A título de exemplo e para a combinação dominante,

ELEMENTO	SECÇÃO	$M_{pl,Rd}$	Factor carga α_p	Nó Rótulas plásticas	$\alpha_{cr,1}$	STATUS
Coluna	HEA450	884,40	0,98	5; 31	8,79	Colapso
Travessa	HEA400	704,55				

ELEMENTO	SECÇÃO	$M_{pl,Rd}$	Factor carga α_p	Nó Rótulas plásticas	$\alpha_{cr,1}$	STATUS
Coluna	HEA500	1085,98			6,94	
Travessa	HEA360	574,20	0,84	9; 27		Colapso

Para a estrutura em causa e após a aplicação das cargas a que irá estar sujeita verifica-se para uma análise plástica que os esforços são iguais aos obtidos para uma análise elástica, o que seria de esperar, pois como foi referido a estrutura encontra-se em regime elástico, nas páginas seguintes encontram-se os diagramas de esforços e deslocamentos para a análise plástica.

As duas rótulas plásticas aconteceriam na estrutura para os seguintes factores de carga,

	α_p	Localização	Secção	Status
1ª Rotula plástica	1,04	Travessa nó 27	HEA400	Não formada
2ª Rotula plástica	1,06	Travessa nó 9	HEA400	Não formada

As rotulas plásticas não tem exactamente o mesmo factor de carga em virtude de ter sido levado em conta as imperfeições geométricas.

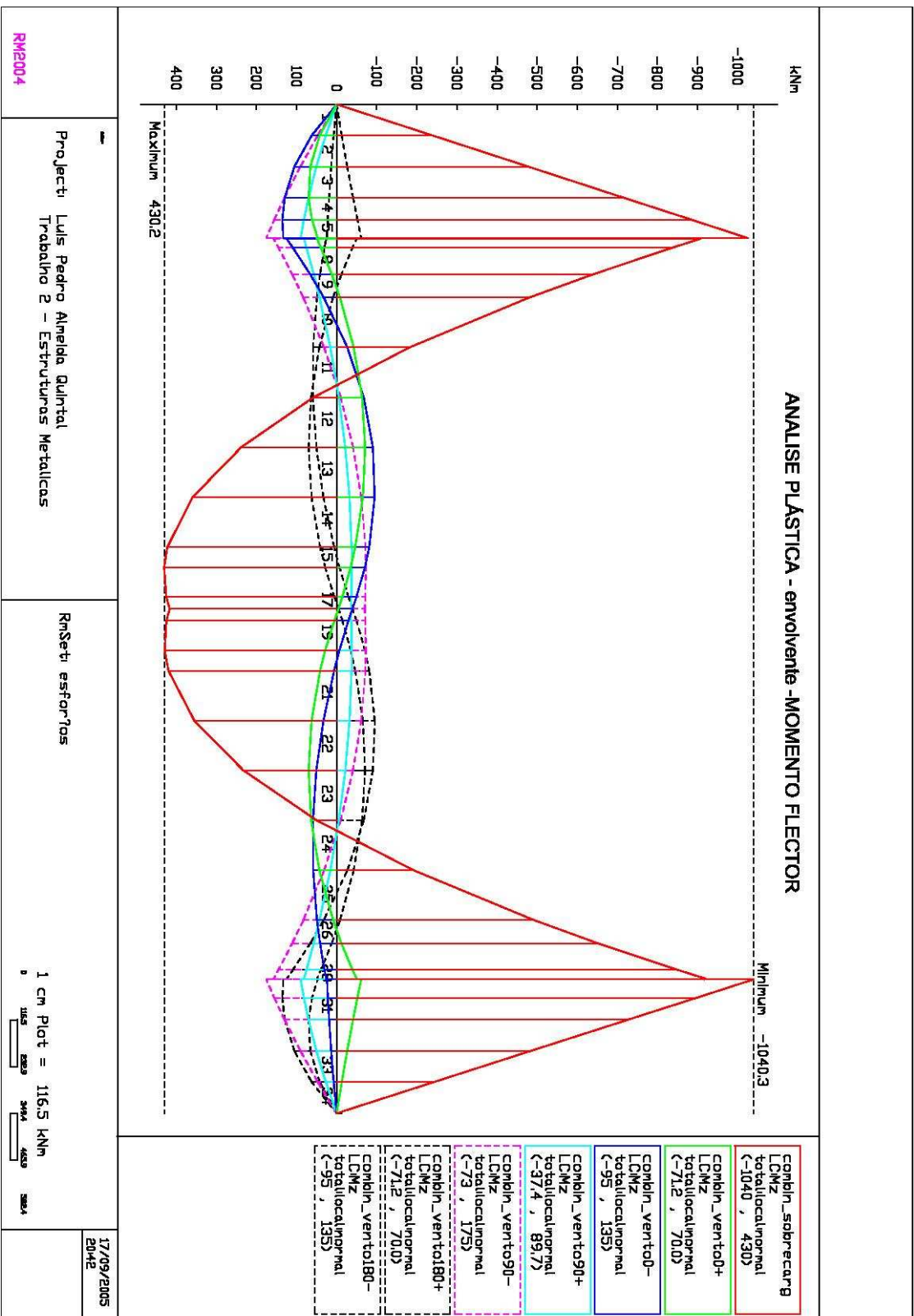
Resumindo, estamos perante uma estrutura que para a combinação dominante apresenta um comportamento em regime elástico.

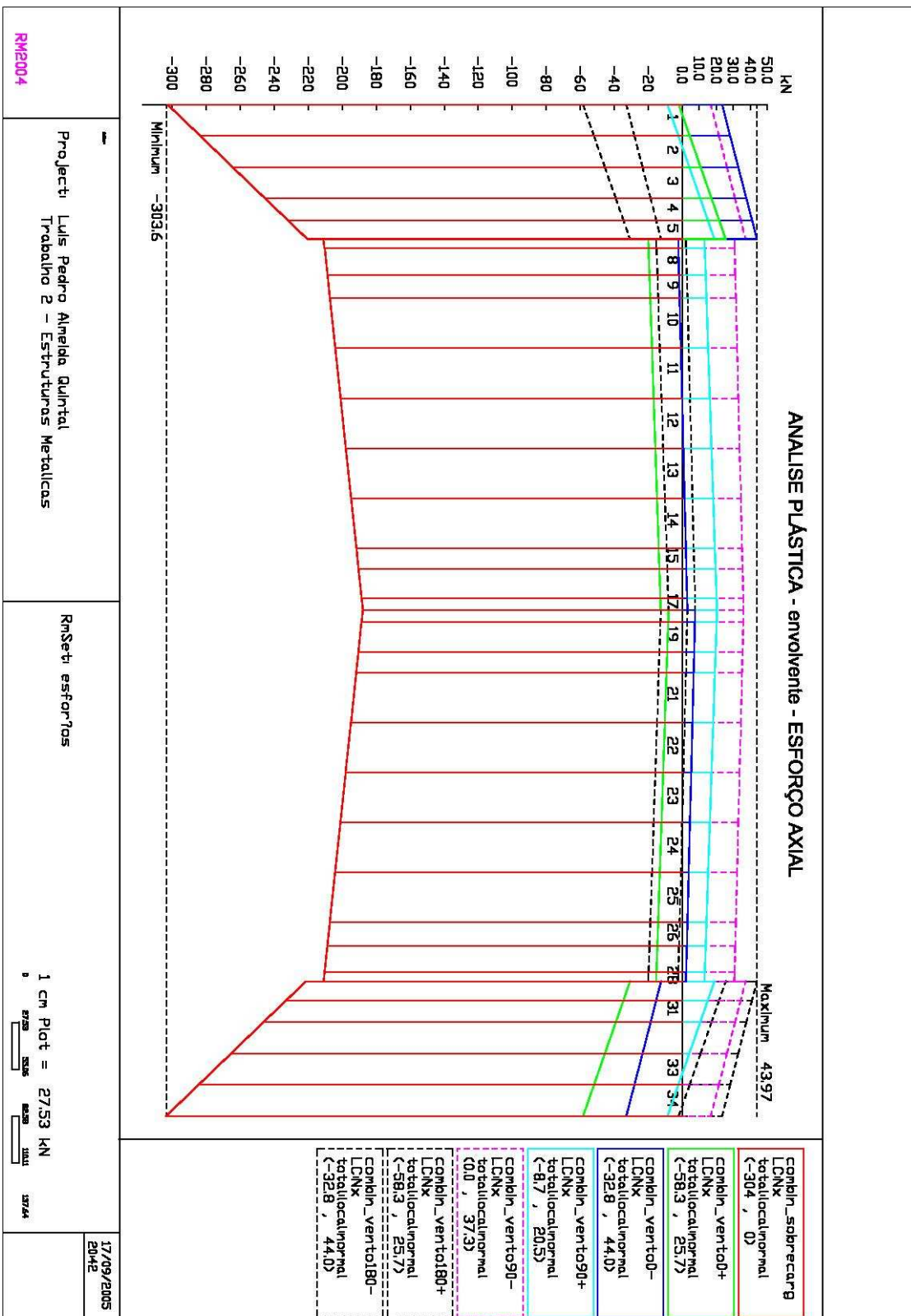
Nestas condições de simetria de carga e de estrutura, com um grau de hiperstaticidade de 1, a formação de uma primeira rótula plástica isolada, só aconteceria se a mesma ocorresse ao nível do eixo de simetria. O que no presente não se verifica.

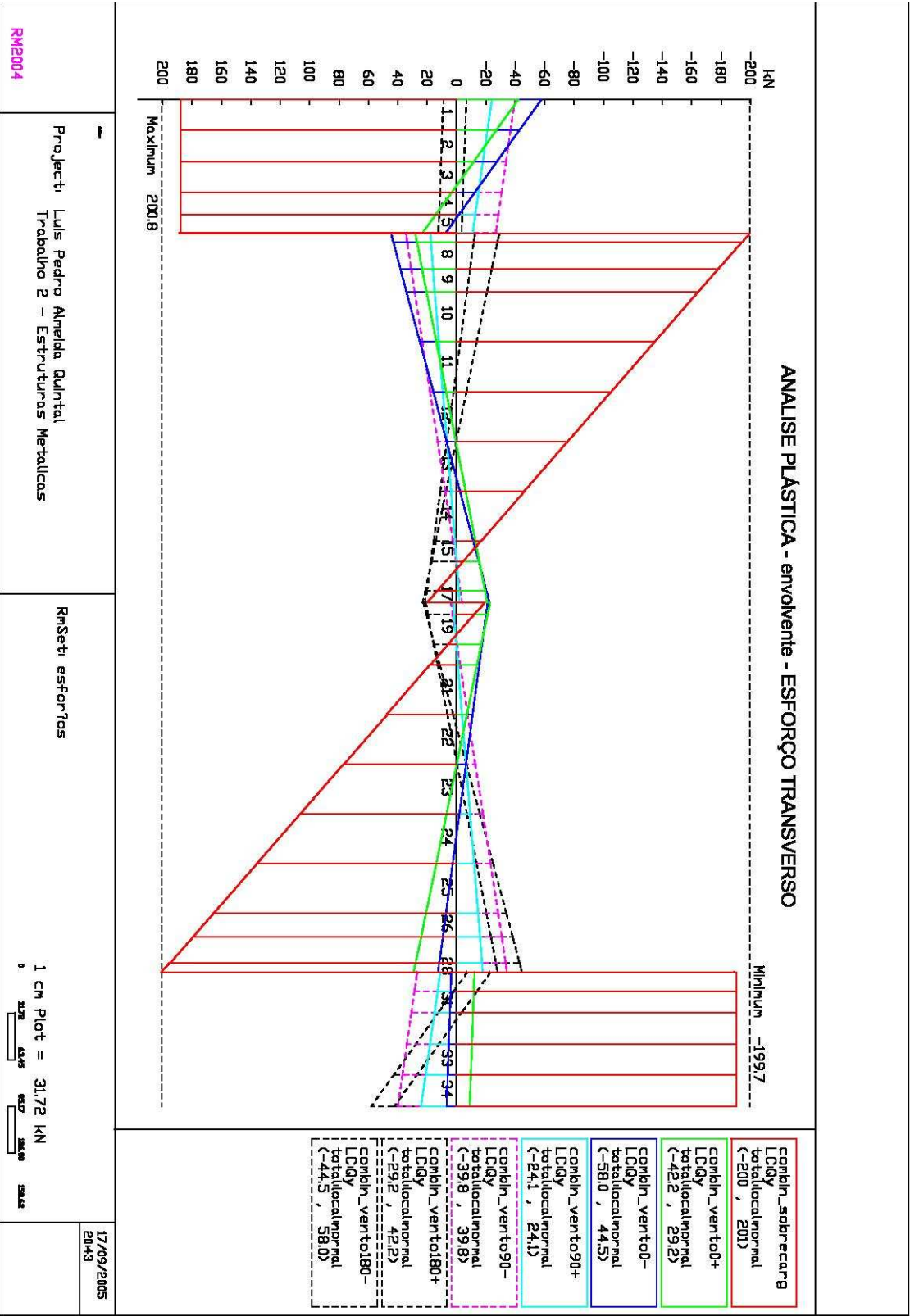
No que se refere às restantes combinações que não apresentam simetria de carregamento, os esforços são inferiores por forma a mobilizar a qualquer capacidade plástica das secções.

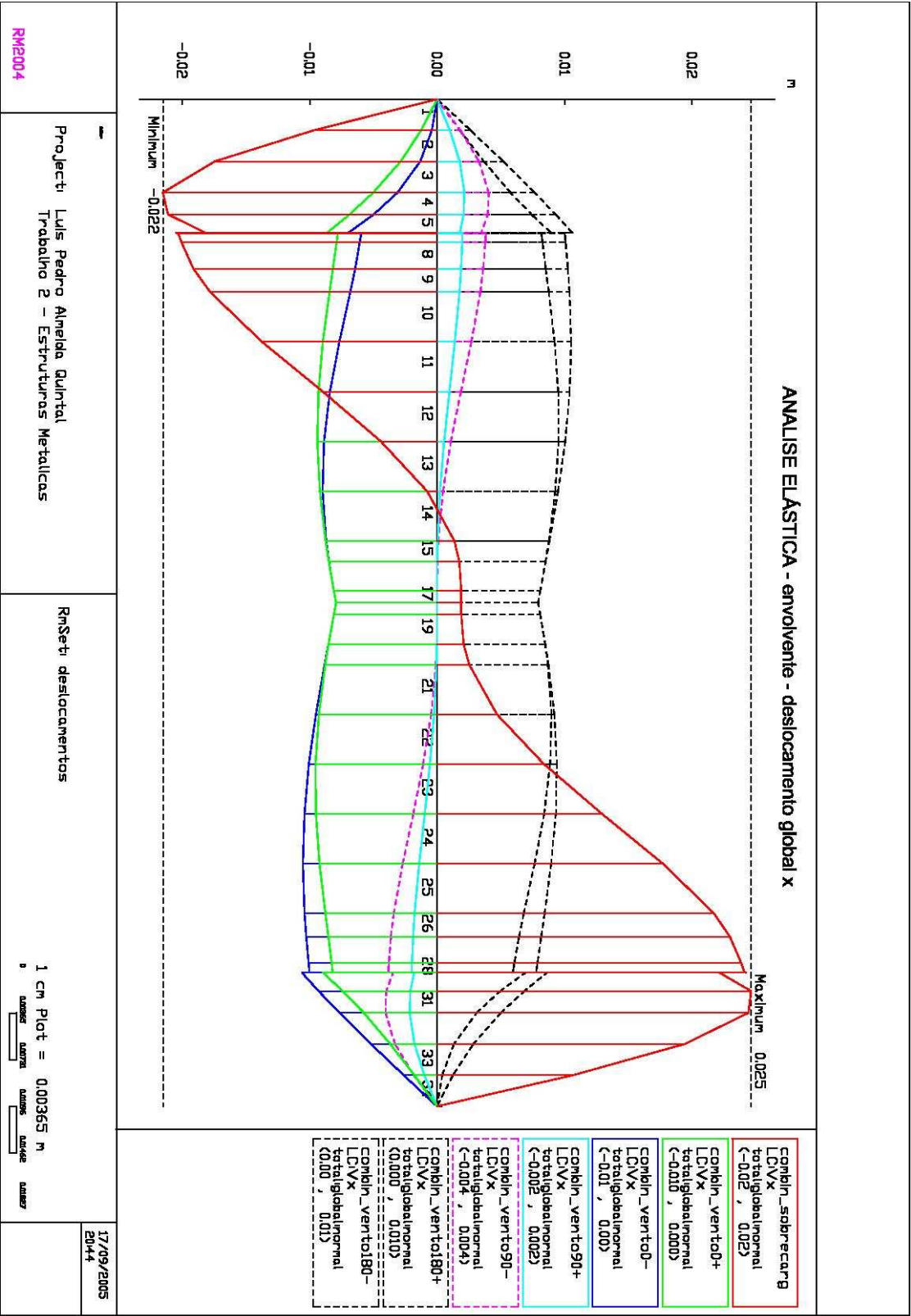
Nota: os efeitos de 2ª ordem para uma análise plástica dão resultados exactamente iguais aos obtidos para uma análise elástica o que seria inteiramente de esperar, pois não se verifica a alteração da rigidez da estrutura com a formação de rotulas plásticas. No calculo dos efeitos de 2ª ordem, além do método P-Δ usado, para uma análise plástica poderia ser usado o método da amplificação de esforços, que resultaria na multiplicação de todos os esforços pelo factor

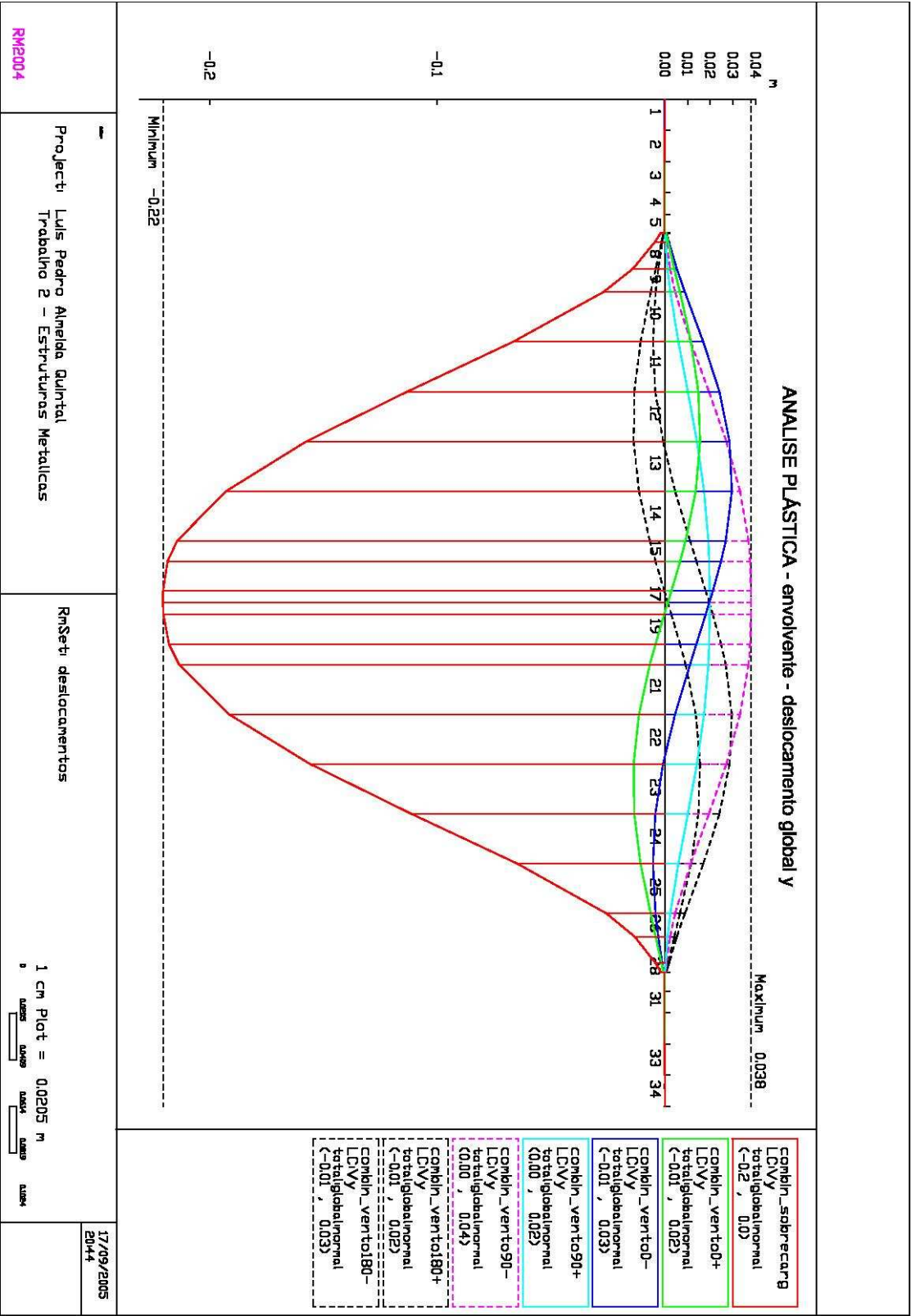
$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{9,060}} = 1,124$$











5. VERIFICAÇÃO DAS SECÇÕES PELO EUROCÓDIGO 3

Para a verificação das secções ao Eurocódigo serão usados os esforços elásticos de 2ª ordem, de acordo com o anteriormente explanado.

5.1 Comprimento estável de segmentos contendo rotulas plásticas para encurvadura fora do plano

Ainda que como mencionado nos capítulos anteriores não se tenha verificado a criação de nenhuma rótula plástica e portanto não ser aplicável ao presente, a título de exemplo e de exercício académico vai-se de seguida efectuar uma verificação de tal, supondo a localização da rótula plástica na travessa.

Segmento de inércia constante.

Secção HEA400.

Propriedades da secção

$W_{pl,y} = 2562 \text{ cm}^3$	$W_{pl,z} = 872,90 \text{ cm}^3$
$i_y = 16,84 \text{ cm}$	$i_z = 7,34 \text{ cm}$
$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	$I_z = 8564 \text{ cm}^4$
$I_T = 189 \text{ cm}^4$	$A_v = 57,33 \text{ cm}^2$
$I_\omega = 2942 \times 10^3 \text{ cm}^6$	

L_m - comprimento estável entre rótula plástica e impedimento lateral imediato.

$$L_m = \frac{38 i_z}{\sqrt{57,4 \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756 C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{A I_T} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad \text{BB.3.1.1}$$

$$C_1 = 1,00$$

$$N_{Ed} = 212,3 \text{ KN}$$

$$L_m = 3,52 \text{ m}$$

L_k - comprimento estável entre rótula plástica e impedimento rotacional imediato - momento constante.

$$L_k = \frac{\left(5,4 + \frac{600 f_y}{E} \right) \left(\frac{h}{t_f} \right) i_z}{\sqrt{5,4 \left(\frac{f_y}{E} \right) \left(\frac{h}{t_f} \right)^2 - 1}} \quad \text{BB.3.1.2}$$

$$L_k = 6,62m$$

L_s - comprimento estável entre rótula plástica e impedimento rotacional imediato - variação momento linear.

$$L_s = \sqrt{C_m} L_k \left(\frac{M_{pl,y,Rd}}{M_{N,y,Rk} + aN_{Ed}} \right) \quad \text{BB.3.1.2}$$

$$C_m = \frac{1}{B_0 + B_1\beta_t + B_2\beta_t^2} = 1,34$$

$$i_s = \sqrt{i_y^2 + i_z^2 + a^2} = 35,60cm$$

$$L_t = 4,00m$$

$$N_{crE} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_t^2} = 11246,19KN$$

$$N_{crT} = \frac{1}{i_s^2} \left(\frac{\pi^2 E I_z a^2}{L_t^2} + \frac{\pi^2 E I_w}{L_t^2} + G I_t \right) = 12352,54KN$$

$$\eta = \frac{N_{crE}}{N_{crT}} = 0,91$$

$$B_0 = \frac{1+10\eta}{1+20\eta} = 0,53$$

$$B_1 = \frac{5\sqrt{\eta}}{\pi+10\sqrt{\eta}} = 0,38$$

$$B_2 = \frac{0,5}{1+\pi\sqrt{\eta}} - \frac{0,5}{1+20\eta} = 0,10$$

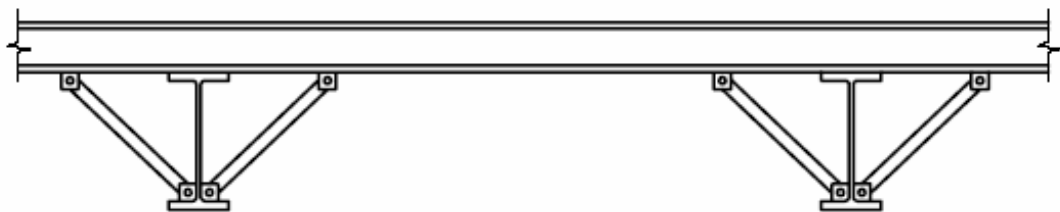
$$\beta_t = \frac{355KN.m}{674KN.m} = 0,53$$

a - distância do centroide da madre ao centroide da travessa=305mm

$$M_{pl,y,Rk} = 704,50KN.m$$

$$M_{N,y,Rk} = 704,50KN.m$$

$$L_s = 7,01 \text{ metros}$$



pormenor dos impedimentos rotacionais

5.2 COLUNA HEA500

Propriedades da secção

$W_{pl,y} = 3949 \text{ cm}^3$	$W_{pl,z} = 1059 \text{ cm}^3$
$i_y = 20,98 \text{ cm}$	$i_z = 7,24 \text{ cm}$
$I_y = 86970 \text{ cm}^4$	$I_z = 10370 \text{ cm}^4$
$I_T = 309,30 \text{ cm}^4$	$A_v = 74,72 \text{ cm}^2$
$I_\omega = 5643 \times 10^3 \text{ cm}^6$	

Dimensões da secção

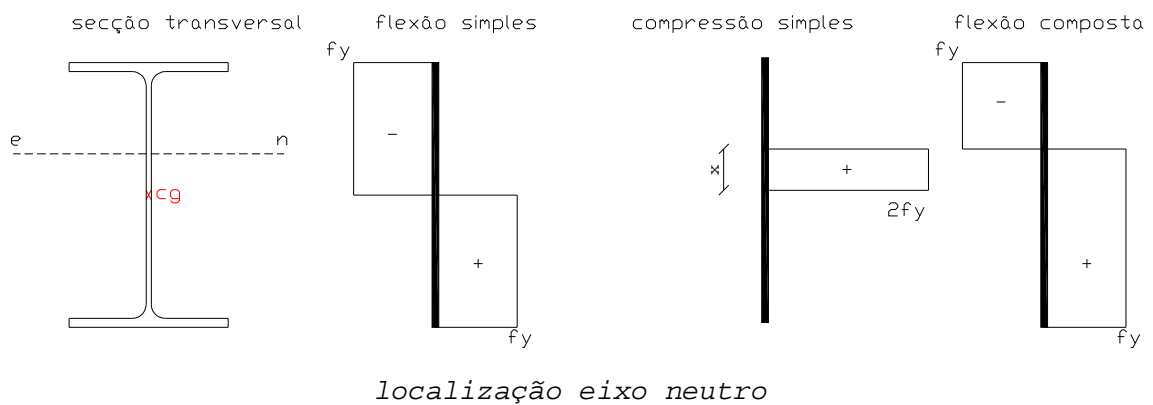
$h = 490 \text{ mm}$	$r = 27 \text{ mm}$
$b = 300 \text{ mm}$	$A = 197,5 \text{ cm}^2$
$t_w = 12 \text{ mm}$	$d = 390 \text{ mm}$
$t_f = 23 \text{ mm}$	

Esforços de verificação

$N_{Ed} = -232,90 \text{ KN}$
$M_{Ed,y} = -922,60 \text{ KN.m}$
$V_{Ed} = 193,80 \text{ KN}$
nó 31

EN 1993-1-1 5.5

Classificação da secção
Table 5.2(sheet 1 e 2)



$$N_{Ed} = 232,90 \text{ KN}$$

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{232,90}{2 \times 275 \times 10^3 \times 12 \times 10^{-3}} = 0,0353 \text{ m}$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r + x}{c} = \frac{490/2 - 23 - 27 + 35,3}{390} = 0,591$$

supondo classe 1

$$\text{como } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$$

$$c/t_w = 390/12 = 32,5 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,591 - 1} = 54,51 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

banzo:

table 5.2

banzo à compressão $c/t \leq 9\varepsilon = 9 \times 0,92 = 8,28$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 300/2 - 12/2 - 27 = 117$$

$$c/t_f = 117/23 = 5,09 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

EN 1993-1-1 6.2.4

Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{197,5 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 5431,25$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{232,90}{5431,25} = 0,043$$

EN 1993-1-1 6.2.5

Flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3949 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 1085,98 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{922,60}{1085,98} = 0,85 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.6
-------------	-------

Esforço Transverso

$$V_{Ed} = 193,80 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{74,72 \times 10^{-4} \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})}{1,00} = 1186,34 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{193,80}{1186,34} = 0,163 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

verificação da dispensa de encurvadura por esforço transverso

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad \varepsilon = 0,92; \eta = 1,00$$

$$72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0,92}{1,00} = 66,24$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{444}{12} = 37,0$$

dispensada a verificação da encurvadura por esforço transverso

EN 1993-1-1	6.2.9
-------------	-------

Flexão e esforço axial

verificação da dispensa de redução do momento plástico resistente

devido ao esforço axial

$$N_{Ed} = 232,90 \text{ KN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \times 5431,25 = 1357,81 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 0,44 \times 0,012 \times 275 E^3}{1,0} = 732,60 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.3.1
-------------	-------

Encurvadura por compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{cr,y} = N_{Ed,inf,coluna} \times \alpha_{cr} = 232,90 \times 9,060 = 2110,07 \text{ KN}$$

$$L_{cr,z} = 2,50 \text{ (considerando os contramentos rotacionais e laterais impostos ao nível da coluna)}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210E^6 \times 10370E^{-8}}{2,5^2} = 34390,0 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{197,5 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{2110,07}} = 1,60 \text{ (esbelteza normalizada)}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{197,5 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{34390,00}} = 0,397$$

curva de encurvadura,

$$\frac{h}{b} = \frac{490}{300} = 1,633 > 1,2 \quad ; \quad t_f \leq 40 \text{ mm}$$

$$y-y \quad \text{curva a} \quad \alpha_y = 0,21 \text{ (coeficiente de imperfeições)}$$

$$z-z \quad \text{curva b} \quad \alpha_z = 0,34$$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,21(1,60 - 0,2) + 1,60^2 \right] = 1,94$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,94 + \sqrt{1,94^2 - 1,60^2}} = 0,331 \text{ (factor de redução)}$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,331 \times 197,5 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 1799,91 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,y}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{232,90}{1799,91} = 0,129 \leq 1,00 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,34(0,397 - 0,2) + 0,397^2 \right] = 0,613$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,613 + \sqrt{0,613^2 - 0,397^2}} = 0,927$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,927 \times 197,5 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 5034,80 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,z}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{232,90}{5034,80} = 0,046 \leq 1,00 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1

6.3.2

Encurvadura lateral devido à flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Calculo de M_{cr}

Anexo F

Elementos de secção uniforme e dupla simetria

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k \cdot L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K \cdot L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 \cdot z_g \right\}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$I_z = 10370 \text{ cm}^4$$

$$k = 1$$

$$k_w = 1$$

$L = 2,5\text{m}$ (comprimento da barra entre pontos com contraventamentos laterais)

$$z_g = h/2 = 245\text{mm}$$

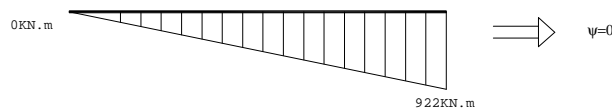
$$I_w = 5643 \times 10^3 \text{ cm}^6$$

$$I_t = 309,30 \text{ cm}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210}{2(1+0,3)} = 80,8 \text{ GPa}$$

table F.1.1

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



$$C_1 = 1,88 - 1,40\psi + 0,52\psi^2 = 1,88; \quad C_2 = 0,0$$

$$M_{cr} = 16054,6 \text{ kN.m}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3949 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{16054,6}} = 0,26$$

$$\bar{\lambda}_{LT} < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad \rightarrow \text{não é necessário verificar encurvadura lateral}$$

EN 1993-1-1	6.3.3
-------------	-------

Encurvadura devido a compressão e flexão

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.61)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.62)$$

elemento não susceptível de encurvadura por deformação torsional
 $\lambda_{LT} \leq 0,4$

$$\begin{aligned} N_{RK} &= f_y \cdot A = 275 \text{E}^3 \times 197,5 \text{E}^{-4} = 5431,25 \text{ KN} \\ M_{y,Rk} &= f_y \cdot W_{pl,y} = 275 \text{E}^3 \times 3949 \text{E}^{-6} = 1085,98 \text{ KN.m} \\ M_{z,Rk} &= f_z \cdot W_{pl,z} = 275 \text{E}^3 \times 1059 \text{E}^{-6} = 291,23 \text{ KN.m} \\ \chi_y &= 0,331 \\ \chi_z &= 0,727 \\ \chi_{LT} &= 1,00 \end{aligned}$$

C_{my}**Table B.3**

C_{my} = 0,90, estrutura com modo de encurvadura de nós móveis

Table B.1

k_{yy}

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + \left(\bar{\lambda}_y - 0,2 \right) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,064$$

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9931$$

$$k_{yy} = 0,9931$$

$$C_{mz} = 0$$

$$K_{zz} = 0$$

$$K_{yz} = 0,6 \quad k_{zz} = 0$$

$$K_{zy} = 0 \text{ para } M_{z,Ed} = 0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00$$

$$0,1294 + 0,8437 + 0 = 0,9731 \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00$$

$$0,046 + 0 + 0 = 0,046 \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

5.3 TRAVESSA HEA400

Propriedades da secção

$W_{pl,y} = 2562 \text{ cm}^3$	$W_{pl,z} = 872,90 \text{ cm}^3$
$i_y = 16,84 \text{ cm}$	$i_z = 7,34 \text{ cm}$
$I_y = 45070 \text{ cm}^4$	$I_z = 8564 \text{ cm}^4$
$I_T = 189 \text{ cm}^4$	$A_v = 57,33 \text{ cm}^2$
$I_\omega = 2942 \times 10^3 \text{ cm}^6$	

Dimensões da secção

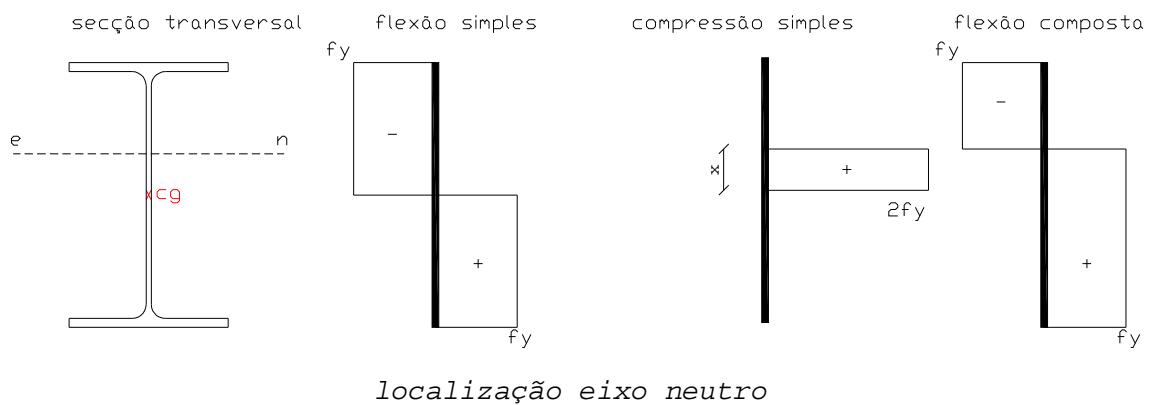
$h = 390 \text{ mm}$	$r = 27 \text{ mm}$
$b = 300 \text{ mm}$	$A = 159 \text{ cm}^2$
$t_w = 11 \text{ mm}$	$d = 298 \text{ mm}$
$t_f = 19 \text{ mm}$	

Esforços de verificação

$N_{Ed} = -212,30 \text{ KN}$
$M_{Ed,y} = -675,50 \text{ KN.m}$
$V_{Ed} = 178,80 \text{ KN}$
nó 27

EN 1993-1-1 5.5

Classificação da secção
Table 5.2(sheet 1 e 2)



$$N_{Ed} = 212,30 \text{ KN}$$

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{212,30}{2 \times 275 \times 10^3 \times 11 \times 10^{-3}} = 0,0351 \text{ m}$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r + x}{c} = \frac{390/2 - 19 - 27 + 35,1}{298} = 0,6178$$

como $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$

$$c/t_w = 298/11 = 27,10 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,6178 - 1} = 51,81 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

banzo:

table 5.2

banzo à compressão $c/t \leq 9\varepsilon = 9 \times 0,92 = 8,28$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 300/2 - 11/2 - 27 = 117,5$$

$$c/t_f = 117,5/19 = 6,18 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

EN 1993-1-1

6.2.4

Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{159,0 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 4372,5$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{212,30}{4372,5} = 0,0486$$

EN 1993-1-1

6.2.5

Flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2562 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 704,55 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{675,50}{704,55} = 0,959 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.6
-------------	-------

Esforço Transverso

$$V_{Ed} = 178,80 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{57,33 \times 10^{-4} \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})}{1,00} = 910,24 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{178,80}{910,34} = 0,19 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

verificação da dispensa de encurvadura por esforço transverso

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad \varepsilon = 0,92; \eta = 1,00$$

$$72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0,92}{1,00} = 66,24$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{352}{11} = 32,00$$

dispensada a verificação da encurvadura por esforço transverso

EN 1993-1-1	6.2.9
-------------	-------

Flexão e esforço axial

verificação da dispensa de redução do momento plástico resistente

devido ao esforço axial

$$N_{Ed} = 212,30 \text{ KN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \times 4372,50 = 1093,13 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 0,352 \times 0,011 \times 275 E^3}{1,0} = 532,4 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.3.1
-------------	-------

Encurvadura por compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{cr,y} = N_{Ed,inf,travessa} \times \alpha_{cr} = 194,00 \times 9,060 = 1757,64 \text{ KN}$$

$L_{cr,z} = 2,00$ (considerando que as madres terão nas ligações com a travessa dispositivos mecânicos que impeçam o deslocamento lateral do banzo comprimido)

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \text{ E}^6 \times 8564 \text{ E}^{-8}}{2^2} = 44374,70 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{159,0 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1757,64}} = 1,58$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{159,0 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{44374,70}} = 0,314$$

curva de encurvadura,

$$\frac{h}{b} = \frac{390}{300} = 1,30 > 1,2 \quad ; \quad t_f \leq 40 \text{ mm}$$

$$y-y \quad \text{curva a} \quad \alpha_y = 0,21$$

$$z-z \quad \text{curva b} \quad \alpha_z = 0,34$$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,21(1,58 - 0,2) + 1,58^2 \right] = 1,894$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,894 + \sqrt{1,894^2 - 1,58^2}} = 0,34$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,34 \times 159,0 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 1488,85 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,y}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{212,30}{1488,85} = 0,143 \leq 1,00 \quad \lll\text{verifica}\ggg$$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,34(0,314 - 0,2) + 0,314^2 \right] = 0,568$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,568 + \sqrt{0,568^2 - 0,314^2}} = 0,96$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,96 \times 159,0 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 4197,6 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,z}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{212,30}{4197,60} = 0,051 \leq 1,00 \quad \lll\text{verifica}\ggg$$

EN 1993-1-1

6.3.2

Encurvadura lateral devido à flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Calculo de M_{cr}

Anexo F

Elementos de secção uniforme e dupla simetria

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k.L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K.L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 \cdot z_g \right\}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$I_z = 8564 \text{ cm}^4$$

$$k = 1$$

$$k_w = 1$$

$L = 2,0 \text{ m}$ (comprimento da barra entre pontos com contraventamentos laterais)

$$z_g = h/2 = 195 \text{ mm}$$

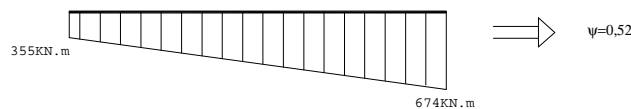
$$I_w = 2942 \times 10^3 \text{ cm}^6$$

$$I_t = 189 \text{ cm}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210}{2(1+0,3)} = 80,8 \text{ GPa}$$

table F.1.1

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



$$\psi = 0,52$$

$$C_1 = 1,88 - 1,40\psi + 0,52\psi^2 = 1,29; \quad C_2 = 0,0$$

$$M_{cr} = 11128,60 \text{ kN.m}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2562 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{11128,60}} = 0,25$$

$$\bar{\lambda}_{LT} < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad \rightarrow \text{não é necessário verificar encurvadura lateral}$$

EN 1993-1-1**6.3.3****Encurvadura devido a compressão e flexão**

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.61)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.62)$$

$$N_{RK} = f_y \cdot A = 275 \text{E}^3 \times 159 \text{E}^{-4} = 4372,50 \text{ KN}$$

$$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{pl,y} = 275 \text{E}^3 \times 2562 \text{E}^{-6} = 704,55 \text{ KN.m}$$

$$M_{z,Rk} = f_z \cdot W_{pl,z} = 275 \text{E}^3 \times 872,9 \text{E}^{-6} = 240,05 \text{ KN.m}$$

$$\chi_y = 0,34$$

$$\chi_z = 0,96$$

$$\chi_{LT} = 1,00$$

elemento não susceptível de encurvadura por deformação torsional
 $\lambda_{LT} \leq 0,4$

C_{my}**Table B.3**

C_{my} = 0,90, estrutura com modo de encurvadura de nós móveis

Table B.1**k_{yy}**

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + \left(\bar{\lambda}_y - 0,2 \right) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,077$$

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,00267$$

$$k_{yy} = 1,00267$$

$$C_{mz} = 0$$

$$K_{zz} = 0$$

$$K_{yz} = 0,6k_{zz} = 0$$

$$K_{zy} = 0 \text{ para } M_{z,Ed} = 0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,00$$

$$0,143 + 0,961 + 0 = 1,10 > 1,00$$

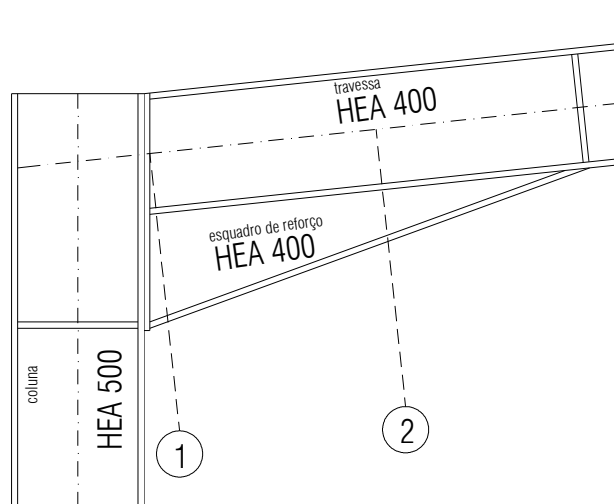
<<<não verifica>>>

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,00$$

$$0,051 + 0 + 0 = 0,051 \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

Nota: a secção verificada encontra-se junto ao reforço, pelo que se este tivesse um comprimento superior, os esforços a absorver pela travessa seriam inferiores o que implicaria a verificação da secção.

REFORÇO**5.3.1 REFORÇO - secção#1**

Propriedades da secção desprezando banzo intermédio

Dimensões da secção

$h = 734 \text{ mm}$	$r = 27 \text{ mm}$
$b = 300 \text{ mm}$	$A = 196,82 \text{ cm}^2$
$t_w = 11 \text{ mm}$	$d = 642 \text{ mm}$
$t_f = 19 \text{ mm}$	

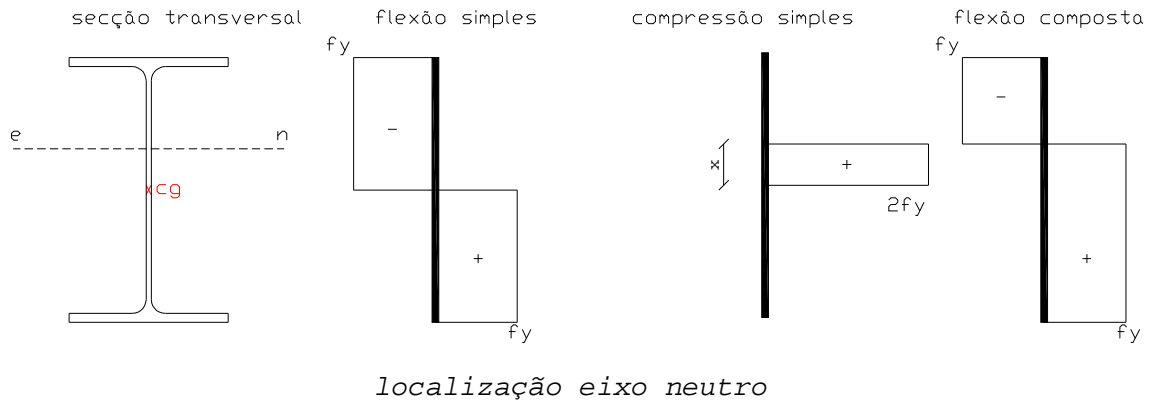
$W_{pl,y} = 5621,64 \text{ cm}^3$	$W_{pl,z} = 883,27 \text{ cm}^3$
$i_y = 30,57 \text{ cm}$	$i_z = 6,59 \text{ cm}$
$I_y = 183958,7 \text{ cm}^4$	$I_z = 8567,64 \text{ cm}^4$
$I_T = 204,30 \text{ cm}^4$	$A_v = 95,17 \text{ cm}^2$
$I_\omega = 10927434 \text{ cm}^6$	

Esforços de verificação

$N_{Ed} = -214,20 \text{ KN}$
$M_{Ed,y} = -944,15 \text{ KN.m}$
$V_{Ed} = 200,48 \text{ KN}$

EN 1993-1-1	5.5
-------------	-----

Classificação da secção
Table 5.2(sheet 1 e 2)



$$N_{Ed} = 214,20 \text{ KN}$$

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{214,20}{2 \times 275 \times 10^3 \times 11 \times 10^{-3}} = 0,0354 \text{ m}$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r + x}{c} = \frac{734/2 - 19 - 21 + 35,4}{642} = 0,555$$

como $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$

$$c/t_w = 642/11 = 58,36 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,555 - 1} = 58,62$$

<<<classe 1>>>

banzo:

table 5.2

banzo à compressão $c/t \leq 9\varepsilon = 9 \times 0,92 = 8,28$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 300/2 - 11/2 - 27 = 117,5$$

$$c/t_f = 117,5/19 = 6,18$$

<<<classe 1>>>

EN 1993-1-1	6.2.4
-------------	-------

Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{196,82 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 5412,55$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{214,20}{5412,55} = 0,040$$

EN 1993-1-1	6.2.5
-------------	-------

Flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5621,64 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 1545,98 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{944,15}{1545,98} = 0,611 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.6
-------------	-------

Esforço Transverso

$$V_{Ed} = 200,48 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{95,17 \times 10^{-4} \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})}{1,00} = 1511,03 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{200,48}{1511,03} = 0,133 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

verificação da dispensa de encurvadura por esforço transverso

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad \varepsilon=0,92; \eta=1,00$$

$$72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0,92}{1,00} = 66,24$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{696}{11} = 63,27$$

dispensada a verificação da encurvadura por esforço transverso

EN 1993-1-1	6.2.9
-------------	-------

Flexão e esforço axial

verificação da dispensa de redução do momento plástico resistente devido ao esforço axial

$$N_{Ed} = 214,20 \text{ KN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \times 5412,55 = 1353,14 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 0,696 \times 0,011 \times 275 E^3}{1,0} = 1052,70 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.3.1
-------------	-------

Encurvadura por compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{cr,y} = N_{Ed, \text{inf}, \text{travessa}} \times \alpha_{cr} = 194 \times 9,060 = 1757,64 \text{ KN} \quad (\text{conservativamente})$$

$$L_{cr,z} = 2,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 E^6 \times 8567,64 E^{-8}}{2^2} = 44393,6 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{196,82 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1757,64}} = 1,75$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{196,82 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{44393,6}} = 0,35$$

curva de encurvadura,

$$\frac{h}{b} = \frac{734}{300} = 2,45 > 1,2 \quad ; \quad t_f \leq 40mm$$

$$y-y \quad \text{curva a} \quad \alpha_y = 0,21$$

$$z-z \quad \text{curva b} \quad \alpha_z = 0,34$$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,21(1,75 - 0,2) + 1,75^2 \right] = 2,20$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,94 + \sqrt{1,94^2 - 1,60^2}} = 0,282$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,282 \times 196,82 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 1530,38 KN$$

$$\frac{N_{Ed,y}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{214,20}{1530,38} = 0,140 \leq 1,00 \quad <<<verifica>>>$$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,34(0,34 - 0,2) + 0,34^2 \right] = 0,59$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,59 + \sqrt{0,59^2 - 0,34^2}} = 0,95$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,95 \times 196,82 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 5118,13 KN$$

$$\frac{N_{Ed,z}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{214,2}{5118,13} = 0,042 \leq 1,00 \quad <<<verifica>>>$$

EN 1993-1-1	6.3.2
-------------	-------

Encurvadura lateral devido à flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Calculo de M_{cr}

Anexo F

Elementos de secção uniforme e dupla simetria

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k.L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K.L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 \cdot z_g \right\}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$I_w = 10927434 \text{ cm}^6$$

$$I_z = 8567,64 \text{ cm}^4$$

$$I_T = 204,30 \text{ cm}^4$$

$$k=1$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210}{2(1+0,3)} = 80,8 \text{ GPa}$$

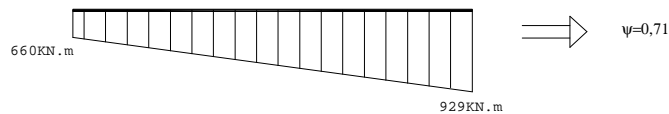
$$k_w=1$$

$$L=2,0\text{m}$$

$$z_g = 734/2 = 367\text{mm}$$

table F.1.1

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



$$C_1 = 1,88 - 1,40\psi + 0,52\psi^2 = 1,15; \quad C_2 = 0,0$$

$$M_{cr} = 18466,3 \text{ KN.m}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{5621,64 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{18466,3}} = 0,29$$

$$\bar{\lambda}_{LT} < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad \rightarrow \text{não é necessário verificar encurvadura}$$

EN 1993-1-1

6.3.3

Encurvadura devido a compressão e flexão

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.61)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.62)$$

elemento não susceptível de encurvadura por deformação torsional

$$\lambda_{LT} \leq 0,4$$

$$N_{RK} = f_y \cdot A = 275 \text{E}^3 \times 196,82 \text{E}^{-4} = 5412,55 \text{ KN}$$

$$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{pl,y} = 275 \text{E}^3 \times 5621,64 \text{E}^{-6} = 1545,95 \text{ KN.m}$$

$$M_{z,Rk} = f_z \cdot W_{pl,z} = 275 \text{E}^3 \times 883,27 \text{E}^{-6} = 242,90 \text{ KN.m}$$

$$\chi_y = 0,28$$

$$\chi_z = 0,95$$

$$\chi_{LT} = 1,00$$

C_{my}**Table B.3**C_{my}= 0,90, estrutura com modo de encurvadura de nós móveis**Table B.1****k_{yy}**

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + \left(\overline{\lambda}_y - 0,2 \right) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,096$$

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,00$$

$$k_{yy} = 1,00$$

$$C_{mz} = 0$$

$$K_{zz} = 0$$

$$K_{yz} = 0,6k_{zz} = 0$$

$$K_{zy} = 0 \text{ para } M_{z,Ed} = 0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,00$$

$$0,140 + 0,611 + 0 = 0,751 \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,00$$

$$0,042 + 0 + 0 = 0,042 \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

5.3.2 REFORÇO - secção#2

Propriedades da secção desprezando banzo intermédio

Dimensões da secção

h= 562 mm	r= 27 mm
b= 300 mm	A= 177,90 cm ²
t _w = 11 mm	d= 490 mm
t _f = 19 mm	

W _{pl,y} = 4010,40 cm ³	W _{pl,z} = 878,10 cm ³
i _y = 23,87 cm	i _z = 6,94 cm
I _y = 101356,7 cm ⁴	I _z = 8565,7 cm ⁴
I _T = 196,70 cm ⁴	A _v = 76,25 cm ²
I _ω = 6302397 cm ⁶	

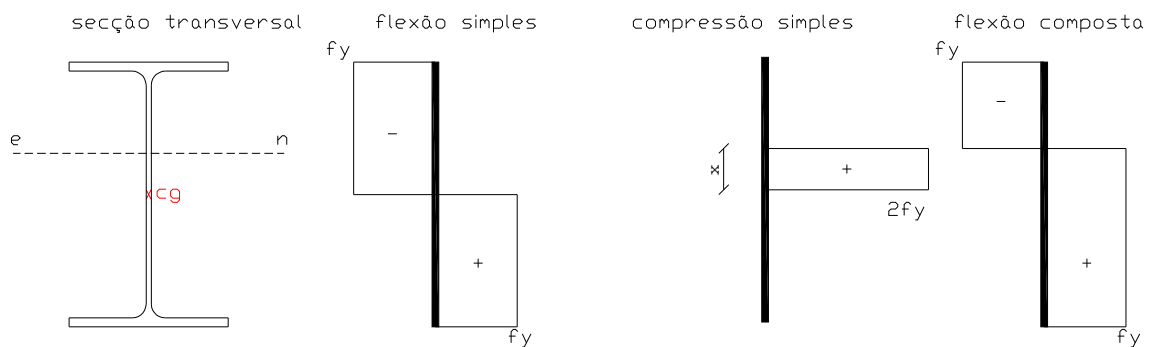
Esforços de verificação

N _{Ed} = -216,80 KN
M _{Ed,y} = -810,77 KN.m
V _{Ed} = 185,00 KN

EN 1993-1-1 5.5

Classificação da secção

Table 5.2(sheet 1 e 2)



localização eixo neutro

N_{Ed}=216,20 KN

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{216,80}{2 \times 275 \times 10^3 \times 11 \times 10^{-3}} = 0,0358m$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r + x}{c} = \frac{562/2 - 19 - 21 + 35,8}{490} = 0,565$$

como $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$

$$c/t_w = 490/11 = 44,55 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,565 - 1} = 57,42 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

banzo:

table 5.2

banzo à compressão $c/t \leq 9\varepsilon = 9 \times 0,92 = 8,28$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 300/2 - 11/2 - 27 = 117,5$$

$$c/t_f = 117,5/19 = 6,18 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.4
-------------	-------

Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{177,9 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 4892,25$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{216,80}{4892,25} = 0,044$$

EN 1993-1-1	6.2.5
-------------	-------

Flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4010,36 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 1102,85 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{810,77}{1102,85} = 0,734 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.6
-------------	-------

Esforço Transverso

$$V_{Ed} = 185,00 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{76,25 \times 10^{-4} \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})}{1,00} = 1210,63 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{185,00}{1210,63} = 0,153 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

verificação da dispensa de encurvadura por esforço transverso

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad \varepsilon = 0,92; \eta = 1,00$$

$$72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0,92}{1,00} = 66,24$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{524}{11} = 47,64$$

dispensada a verificação da encurvadura por esforço transverso

EN 1993-1-1	6.2.9
-------------	-------

Flexão e esforço axial

verificação da dispensa de redução do momento plástico resistente devido ao esforço axial

$$N_{Ed} = 214,20 \text{ KN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \times 4892,25 = 1223,06 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 0,524 \times 0,011 \times 275 E^3}{1,0} = 792,55 \text{ KN} \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.3.1
--------------------	--------------

Encurvadura por compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{cr,y} = N_{Ed,inf,travessa} \times \alpha_{cr} = 194 \times 9,060 = 1757,64 \text{ KN} \quad (\text{conservativamente})$$

$$L_{cr,z} = 2,00 \text{ m}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \text{ E}^6 \times 8565,73 \text{ E}^{-8}}{2^2} = 44383,7 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{177,90 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1757,64}} = 1,668$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{177,90 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{44383,7}} = 0,33$$

curva de encurvadura,

$$\frac{h}{b} = \frac{562}{300} = 1,87 > 1,2 \quad ; \quad t_f \leq 40 \text{ mm}$$

$$y-y \quad \text{curva a} \quad \alpha_y = 0,21$$

$$z-z \quad \text{curva b} \quad \alpha_z = 0,34$$

$$\Phi_y = 0,5 \left[1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,21(1,668 - 0,2) + 1,668^2 \right] = 2,05$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{2,05 + \sqrt{2,05^2 - 1,668^2}} = 0,31$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,31 \times 177,9 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 1514,46 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,y}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{216,8}{1514,46} = 0,143 \leq 1,00 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$\Phi_z = 0,5 \left[1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,34(0,33 - 0,2) + 0,33^2 \right] = 0,58$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,58 + \sqrt{0,58^2 - 0,33^2}} = 0,95$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,95 \times 177,9 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 4658,65 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed,z}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{216,80}{4658,65} = 0,047 \leq 1,00 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1

6.3.2

Encurvadura lateral devido à flexão

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Calculo de M_{cr}

Anexo F

Elementos de secção uniforme e dupla simetria

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k.L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K.L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 \cdot z_g \right\}$$

E=210 GPa

 $I_z = 8565,73 \text{ cm}^4$

k=1

 $k_w = 1$

L=2,0m

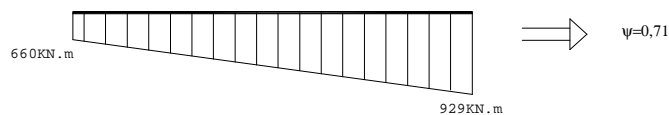
 $I_w = 6302397 \text{ cm}^6$ $I_t = 196,67 \text{ cm}^4$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210}{2(1+0,3)} = 80,8 \text{ GPa}$$

 $z_g = 562/2 = 281 \text{ mm}$

table F.1.1

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



$$C_1 = 1,88 - 1,40\psi + 0,52\psi^2 = 1,15; \quad C_2 = 0,0$$

 $M_{cr} = 14177,80 \text{ kN.m}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4010,36 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{18466,3}} = 0,28$$

$$\bar{\lambda}_{LT} < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad \rightarrow \text{não é necessário verificar encurvadura}$$

EN 1993-1-1

6.3.3

Encurvadura devido a compressão e flexão

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.61)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00 \quad (6.62)$$

elemento não susceptível de encurvadura por deformação torsional
 $\lambda_{LT} \leq 0,4$

$$N_{RK} = f_y \cdot A = 275 \text{E}^3 \times 177,92 \text{E}^{-4} = 4892,25 \text{ KN}$$

$$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{pl,y} = 275 \text{E}^3 \times 4010,36 \text{E}^{-6} = 1102,85 \text{ KN.m}$$

$$M_{z,Rk} = f_z \cdot W_{pl,z} = 275 \text{E}^3 \times 878,10 \text{E}^{-6} = 241,48 \text{ KN.m}$$

$$\chi_y = 0,31$$

$$\chi_z = 0,95$$

$$\chi_{LT} = 1,00$$

C_{my}

Table B.3

C_{my} = 0,90, estrutura com modo de encurvadura de nós móveis

Table B.1

k_{yy}

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,089$$

$$k_{yy} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 1,0031$$

$$k_{yy} = 1,0031$$

$$C_{mz} = 0$$

$$K_{zz} = 0$$

$$K_{yz} = 0,6 K_{zz} = 0$$

$$K_{zy} = 0 \text{ para } M_{z,Ed} = 0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{RK}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

$$0,1431 + 0,737 + 0 = 0,8806 \leq 1,00$$

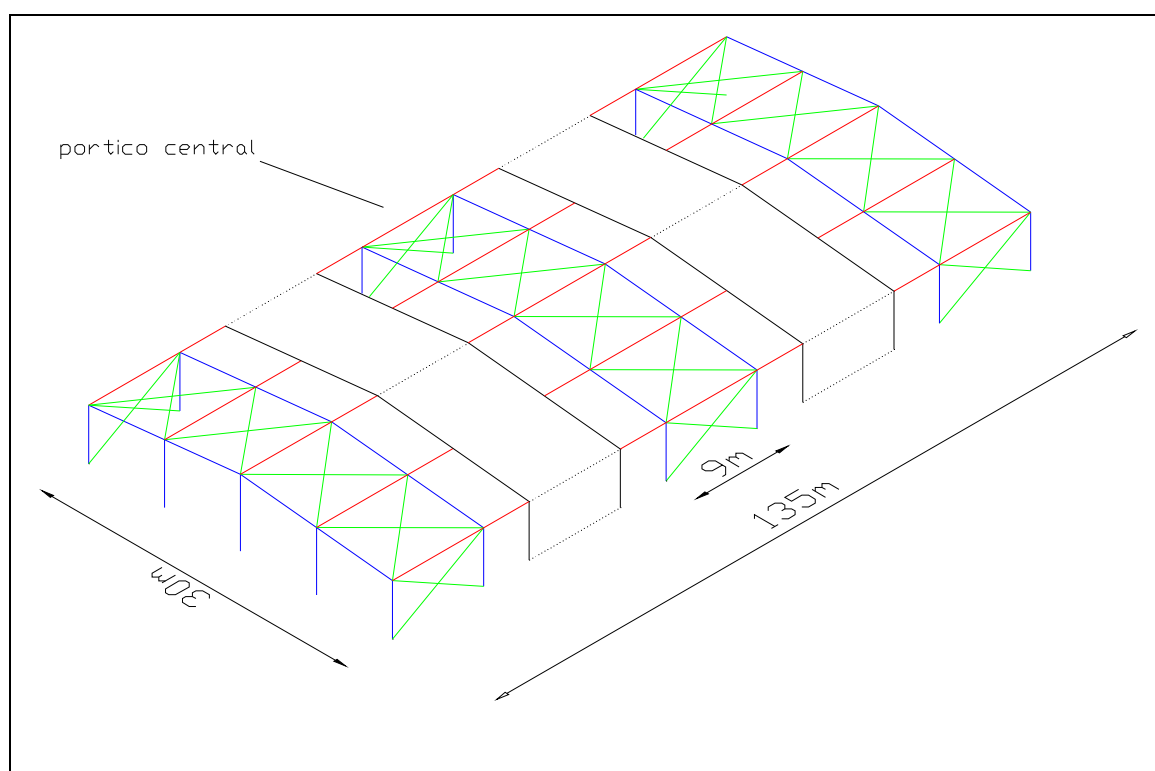
$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{RK}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,00$$

<<<verifica>>>

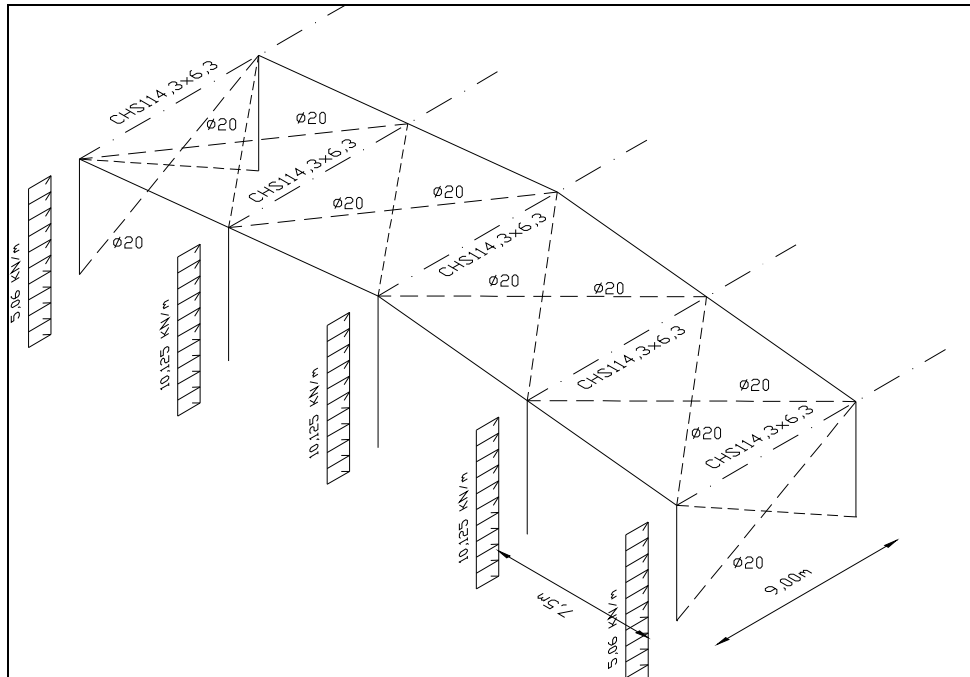
$$0,047 + 0 + 0 = 0,047 \leq 1,00$$

6. CONTRAVENTAMENTOS

Por forma a absorver principalmente os esforços produzidos pelo vento quando actua sobre as fachadas laterais paralelas com a disposição dos pórticos, irão ser calculados segundo um modelo de treliças cujos elementos diagonais serão varões com capacidade resistente apenas à tracção e os elementos verticais que fazem a união entre os pórticos por perfis de tubo CHS.

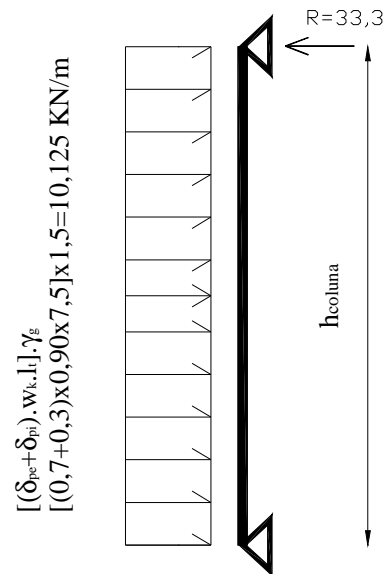


esquema de contraventamentos

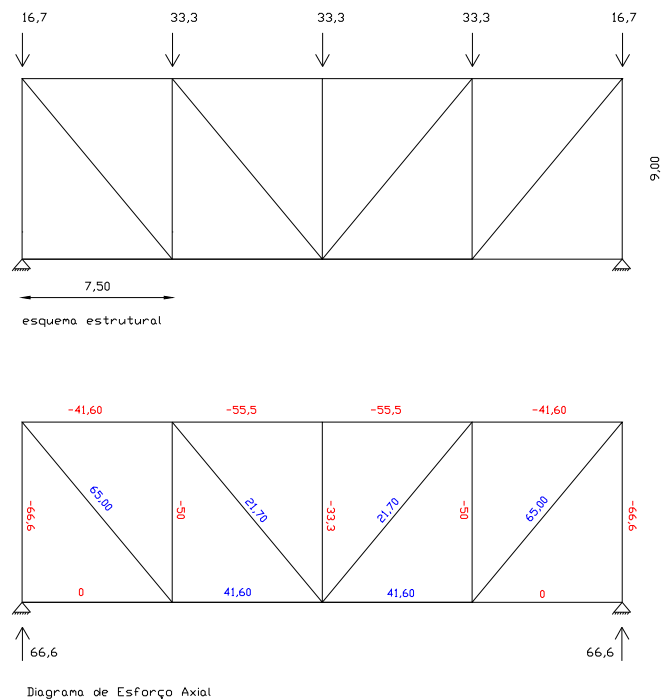


pormenor de contraventamento e aplicação de forças

a força do vento concentrada ao nível das colunas laterais será conduzida segundo a área de influência para a estrutura treliçada que será responsável pela absorção de metade desta, sendo a restante absorvida pelo apoio formado pela fundação.



O que se traduz para o cálculo dos esforços dos contraventamentos da cobertura que se representa na seguinte estrutura em treliça, e que se encontra projectada sobre o plano horizontal



2.1 Contraventamentos da Cobertura

2.2.1 Dimensionamento de varões diagonais

$N_{Ed}=65,00$ (tracção)

EN 1993-1-1	6.2.3
-------------	-------

$$N_{pl.RD} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl.RD}} \leq 1,00 \Leftrightarrow \frac{65,00}{\frac{A \times 275 \times 10^3}{1,00}} \leq 1,00$$

$$A \geq 2,36 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \Rightarrow d \geq 17,34 \text{ mm}$$

o que resulta num varão de classe S275 com um diâmetro $\phi 20$.

2.2.2 Dimensionamento de elementos comprimidos

$N_{Ed} = -66,6$ (compressão)

Pré-dimensionamento

$$N_{Ed} \leq N_{cr} \Leftrightarrow N_{Ed} \leq \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \Leftrightarrow 66,6 = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times I}{9^2} \Leftrightarrow I \geq 260 \text{ cm}^4$$

$L_{cr} = 9,00$ m, trata-se de um elemento bi-rotulado e portanto $L_{cr} = l$

a que corresponde um perfil em tubo **CHS 114,30x6,3**

características do perfil CHS 114,30x6,3

$$I = 312,70 \text{ cm}^4$$

$$i = 3,825 \text{ cm}$$

$$W_{pl} = 90,57 \text{ cm}^3$$

$$A = 21,38 \text{ cm}^2$$

Dimensionamento

EN 1993-1-1	5.5
-------------	-----

Classificação da secção

Table 5.2(sheet 3 de 3)

$d/t \leq 50\epsilon^2$ para classe 1

$$50\epsilon^2 = 50 \times 0.85^2 = 58.82$$

$$d/t = 114,30/6,3 = 18,14$$

<<<classe1>>>

EN 1993-1-1	6.2.4
-------------	-------

Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{21,38 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 587,95$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{66,6}{587,95} = 0.1122$$

EN 1993-1-1	6.3
-------------	-----

Resistência à encurvadura

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 312,70 \times 10^{-8}}{9^2} = 80 \text{ KN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{21,38 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{80}} = 2,71$$

tratando-se de um tubo circular laminado a quente e de classe S275 a curva de encurvadura correspondente é α

$$\alpha = 0,21$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,21(2,71 - 0,2) + 2,71^2 \right] = 4,44$$

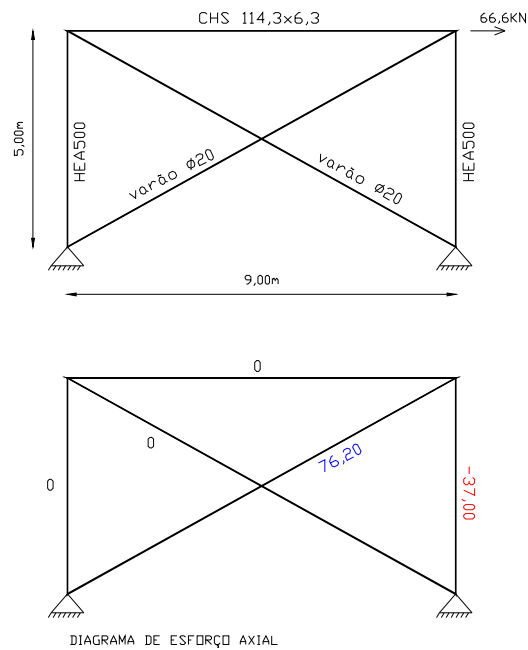
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{4,44 + \sqrt{4,44^2 - 2,71^2}} = 0,126$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,126 \times 21,38 \times 10^{-4} \times 275 \times 10^3}{1,00} = 74 \text{ KN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{66,6}{74} = 0,899 \leq 1,00 \quad \lll\text{verifica}\ggg$$

2.2 Contraventamentos da Parede Lateral

As reacções obtidas dos esforços provenientes da treliça de contraventamentos da cobertura são absorvidas pelo sistema de contraventamentos da parede que as encaminham para o apoio formado pela fundação. Este sistema de forças é traduzido no seguinte esquema estrutural:



2.2.1 Dimensionamento de varões diagonais

$N_{Ed}=76,20$ (tracção)

EN 1993-1-1	6.2.3
-------------	-------

$$N_{pl.RD} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl.RD}} \leq 1,00 \Leftrightarrow \frac{76,20}{\frac{A \times 275 \times 10^3}{1,00}} \leq 1,00$$

$$A \geq 2,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \Rightarrow d \geq 18,78 \text{ mm}$$

o que resulta num varão de classe S275 com um diâmetro $\phi 20$.

7. MADRES

Para o cálculo das madres, que apenas terão a função de suporte da cobertura e das cargas aí aplicadas, com atenção a todas as combinações que estão inseridas no cálculo da estrutura.

A combinação de acção mais condicionante para o cálculo das mesmas é e como se viu atrás a combinação base acção sobrecarga.

As madres serão calculadas considerando-se que as mesmas simplesmente apoiadas nas travessas do pórtico. De referir que as mesmas deverão ser assentes sobre furação rasgada de forma a possibilitar a dilatação das mesmas devido à acção da temperatura, e que corresponde a uma variação dada pela formula:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l = 12 \times 10^{-6} \times 15 \times 9 = 1,62 \text{ mm}$$

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$$

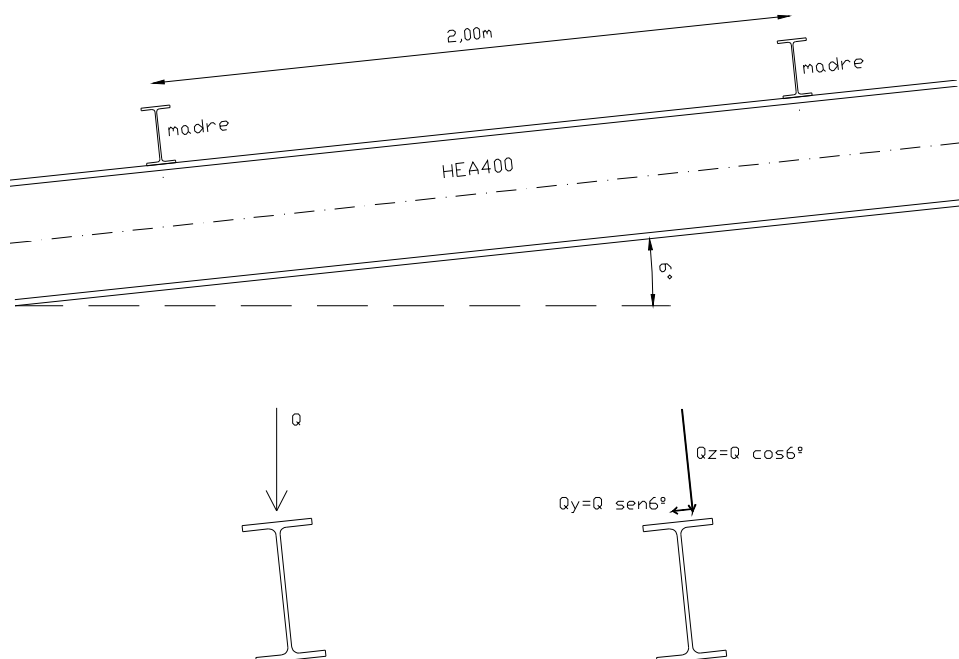
$$\Delta T = 15^\circ \text{C}$$

$$l = 9 \text{ m}$$

o que implica que as madres deverão ser colocadas com uma furação rasgada de 3,24mm. Entende-se por furação rasgada a extensão do furo adicional à normalmente necessária para a colocação dos parafusos, apenas na direcção da madre.

As madres serão colocadas em função do material da cobertura, o que para o presente se cifra num espaçamento entre as mesmas de 2,00 metros.

Assim,



pelo que de acordo com o anteriormente estabelecido e atendendo as pressupostos considerados no dimensionamento, temos:

Peso próprio: $0,25 \text{ KN/m}^2$

Sobrecarga: $0,75 \text{ KN/m}^2$

o que e atendendo ao afastamento entre madres resulta em:

$Q = \gamma_q \times PP + \gamma_g \times Sob = [1,35 \times 0,25 + 1,5 \times 0,75] \times 2 = 2,925 \text{ KN/m}$ (combinação mais desfavorável)

$Q_z = 2,925 \times \cos 6^\circ = 2,91$

$Q_y = 2,925 \times \sin 6^\circ = 0,306$

$$M_{Edy} = \frac{Q_z \cdot l^2}{8} = \frac{2,91 \times 9^2}{8} = 29,46 \text{ KN.m}$$

$$M_{Edz} = \frac{Q_y \cdot l^2}{8} = \frac{0,306 \times 9^2}{8} = 3,10 \text{ KN.m}$$

Pré-dimensionamento

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,00$$

supondo classe 1

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{Ed} \leq \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \Leftrightarrow W_{pl} \geq \frac{29,46}{275 \times 10^3} \Leftrightarrow W_{pl} \geq 107,12 \text{ cm}^3$$

vamos também considerar como deslocamento vertical máximo os valores tomados por:

$$\delta_{\max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$$

em que

δ_{\max} = flecha no estado final relativamente à linha recta que une os apoios.

δ_0 = contra-flecha da viga no estado não carregado (estado 0)

δ_1 = variação da flecha devida às acções permanentes imediatamente após a sua aplicação (estado 1)

δ_2 = variação da flecha da viga devida às acções variáveis acrescida de deformações diferidas devidas às acções permanentes (estado 2)

vamos impor como limites máximos $\delta_{\max} < 1/200$; $\delta_2 < 1/250$

$$\delta_0 = 0$$

δ_2

$$Q_{\delta_2} = \gamma_g \times S_{ob} = [1,5 \times 0,75] \times 2 = 2,25 \text{ KN/m}$$

A que corresponde um momento máximo a meio vão

$$M_{\max \delta_2} = Q_{\delta_2} \times l^2 / 8 = 22,8 \text{ KN.m}$$

Pelo método da carga unitária temos um deslocamento a meio vão de

$$\delta_2 = \frac{1}{E.I} \left[\frac{5}{12} \times 22,8 \times 2,25 \times 9 \right]$$

 δ_{\max}

$$Q_{\delta_1} = \gamma_q \times P.P + \gamma_g \times S_{ob} = [1,35 \times 0,25 + 1,5 \times 0,75] \times 2 = 2,925 \text{ KN/m}$$

A que corresponde um momento máximo a meio vão

$$M_{\max \delta_1} = Q_{\delta_{\max}} \times l^2 / 8 = 29,62 \text{ KN.m}$$

Pelo método da carga unitária temos um deslocamento a meio vão de

$$\delta_{\max} = \frac{1}{E.I} \left[\frac{5}{12} \times 29,62 \times 2,25 \times 9 \right]$$

assim,

$$\delta_2 < \frac{1}{E.I} \left[\frac{5}{12} \times 22,8 \times 2,25 \times 9 \right] \Leftrightarrow 1/250 < \frac{192,375}{E.I} \Leftrightarrow I > 2544,64 \text{ cm}^4$$

$$\delta_{\max} < \frac{1}{E.I} \left[\frac{5}{12} \times 29,62 \times 2,25 \times 9 \right] \Leftrightarrow 1/200 < \frac{249,92}{E.I} \Leftrightarrow I > 2644,66 \text{ cm}^4$$

o que pressupõe a utilização de um perfil **IPE220**

características do perfil IPE 220

$$W_{pl,y} = 285,4 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} = 58,11 \text{ cm}^3$$

$$i_y = 9,11 \text{ cm}$$

$$i_z = 2,48 \text{ cm}$$

$$I_y = 2772 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 204,90 \text{ cm}^4$$

$$A = 33,37 \text{ cm}^2$$

$$A_v = 15,88 \text{ cm}^2$$

Dimensionamento

EN 1993-1-1	5.5
-------------	-----

Classificação da secção

Table 5.2(sheet 1 e 2)

alma

$$c/t_w \leq 72\varepsilon \text{ para classe 1}$$

$$72\varepsilon = 72 \times 0.92 = 66,24$$

$$c/t_w = 177,6/5,9 = 30,10$$

<<<classe1>>>

banzo à compressão

$$c/t_f \leq 9\varepsilon \text{ para classe 1}$$

$$9\varepsilon = 9 \times 0.92 = 8,28$$

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 110/2 - 5.9/2 - 12 = 40,05$$

$$c/t_f = 40,05/9,2 = 4,35$$

<<<classe1>>>

EN 1993-1-1	6.2.5
-------------	-------

Flexão

$$\frac{M_{Edy}}{M_{cy,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{cy,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{285,4 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 78,49 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Edy}}{M_{cy,Rd}} = \frac{29,46}{78,49} = 0,38 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

$$\frac{M_{Edz}}{M_{cz,Rd}} \leq 1,00$$

$$M_{cz,Rd} = \frac{W_{plz} \cdot f_z}{\gamma_{M0}} = \frac{58,11 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{1,0} = 15,98 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Edy}}{M_{cy,Rd}} = \frac{3,10}{15,98} = 0,19 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

EN 1993-1-1	6.2.6
-------------	-------

Esforço Transverso

$$V_{Ed} = \frac{Q \cdot l}{2} = \frac{2,925 \times 9}{2} = 13,1625 \text{ KN}$$

(desprezando a inclinação da carga e a excentricidade por ela causada)

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,00$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{15,88 \times 10^{-4} \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})}{1,00} = 252,13 \text{ KN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{13,16}{252,13} = 0,052 \leq 1 \quad <<<\text{verifica}>>>$$

verificação da dispensa de encurvadura por esforço transversal

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad \varepsilon=0,92; \eta=1,00$$

$$72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0,92}{1,00} = 66,24$$

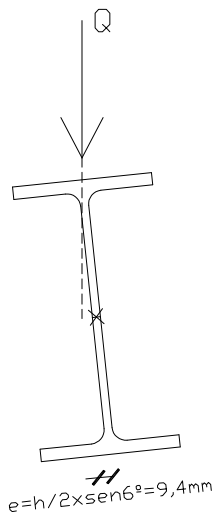
$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{201,6}{5,9} = 34,17$$

dispensada a verificação da encurvadura por esforço transversal

EN 1993-1-1	6.2.7
-------------	-------

Torsão

Devido à inclinação das madres, existe efectivamente uma excentricidade da carga relativamente ao centro de gravidade da secção, pelo que existe a formação de momento torsor. No entanto os valores envolvidos são perfeitamente desprezáveis.



$$M_t = Q \cdot e = 2,925 \times 9,4 \times 10^{-3} = 0,02745 \text{ KN.m/m (carga distribuída)}$$

EN 1993-1-1	6.2.8
-------------	-------

Flexão e esforço transversal

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{13,16}{252,13} = 0,052 < 50\%,$$

pelo que se despreza a interação Flexão Esforço Transverso

EN 1993-1-1	6.2.9
-------------	-------

Flexão desviada

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{pl.y.Rd}} \right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{pl.z.Rd}} \right]^{\beta} \leq 1$$

$$M_{pl.y.Rd} = 78,49 \text{ KN}$$

$$M_{pl.z.Rd} = 15,98 \text{ KN}$$

secções em I

$$\alpha = 2; \beta = 1$$

$$\left[\frac{29,46}{78,49} \right]^2 + \left[\frac{3,10}{15,98} \right]^1 = 0,334 < 1$$

<<verifica>>>

EN 1993-1-1	6.3.2
-------------	-------

Encurvadura lateral

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,00$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Calculo de M_{cr} **Anexo F**

Elementos de secção uniforme e dupla simetria

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k.L)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K.L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 \cdot z_g \right\}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$I_z = 204,9 \text{ cm}^4$$

$$k = 1$$

$$k_w = 1$$

L=9m (comprimento da barra entre pontos com contraventamentos laterais)

$$z_g = h/2 = 110 \text{ mm}$$

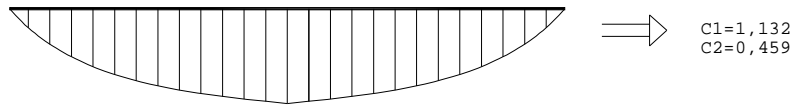
$$I_w = 22,67 \times 10^3 \text{ cm}^6$$

$$I_t = 9,07 \text{ cm}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{210}{2(1+0,3)} = 80,8 \text{ GPa}$$

table F.1.2

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



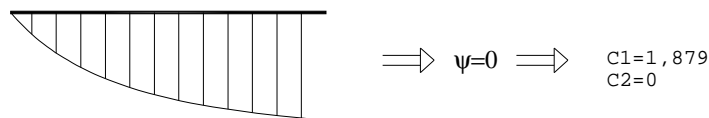
$$M_{cr} = 20,25 \text{ KN.m}$$

Como o M_{cr} é inferior ao momento actuante $M_{Ed} = 29,46 \text{ KN.m}$, é notório que nestas condições não se verificará as condições da encurvadura lateral. Deste modo a solução passará pela introdução de um ponto de restrição lateral a meio vão. Assim, teremos:

$$L = 4,5 \text{ metros}$$

table F.1.1

diagrama de momentos entre pontos restringidos lateralmente



$$M_{cr} = 84,52 \text{ KN.m}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{285,4 \times 10^{-6} \times 275 \times 10^3}{84,52}} = 0,964$$

$$\bar{\lambda}_{LT} > \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \rightarrow \text{necessário verificar encurvadura}$$

6.3.2.3

table 6.5

$h/b = 220/110 = 2 \leq 2 \rightarrow$ curva de encurvadura b

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 ; \beta = 0,75$$

$$\Phi_{LT} = 0,944$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,00 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = 1,076 \end{cases}$$

$$\chi_{LT} = 0,722$$

table 6.5

$$k_c$$

$\psi = 0$ (atendendo à distribuição do momento flector)

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33}$$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \quad \text{mas } f \leq 1,00$$

$$f = 0,883$$

$$\chi_{LT, \text{mod}} = \frac{\chi_{LT}}{f} = 0,81788$$

$$M_{b, Rd} = \frac{\chi_{LT, \text{mod}} \cdot W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 64,19 \text{ KN.m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b, Rd}} = \frac{29,46}{64,19} = 0,459 < 1$$

<<<verifica>>>