

Relatório

Resistência dos perfis a ensaiar

No âmbito de:

Projecto de investigação PTDC/EME-PME/64913/2006

Estudo experimental do comportamento de elementos em aço protegidos com tintas intumescentes em condições de incêndio

Coordenação Científica: Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Março de 2010

Sérgio Roque

N.º16344

Este documento é meramente explicativo sobre os cálculos efectuados para a determinação das capacidades resistentes das secções, não deve ser tomado como definitivo, mas sim como referência para o relatório final.

Índice

Dados:	5
Objectivos:	5
Características do material:	6
Convenção dos eixos:.....	7
Classificação das secções	7
Tipos de classes.....	8
IPE100 S235	10
IPE220 S235	12
SHS 100x100x4 S235	15
CHS 101,6x4,05 S235.....	17
LNP 100x50x8 S275	18
Resumo das classificações	20
Características das secções	20
LNP 100x50x8.....	21
Resumo das características	21
Cálculo do grau de utilização	22
Capacidade plástica resistente das secções por carga de compressão.....	23
Resumo das resistências plásticas à compressão.....	24
Capacidade plástica das secções por carga de flexão.	24
À temperatura ambiente.....	24
Em condições de incêndio.	25
Resumo das resistências plásticas á flexão	26

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Resistência à instabilidade das secções por carga de compressão.	26
À temperatura ambiente.	26
Em condições de fogo.	28
Resumo das resistências por instabilidade à compressão.	31
Resistência à instabilidade por carga de flexão.	31
À temperatura ambiente	31
Em condições de incêndio.	33
Cálculo do momento crítico.	35
Resumo das resistências por instabilidade da secção por carga de flexão.	40
Valor de carga admissível.	40
Resumo da capacidade de carga resistente nas secções.	41

Dados:

Secções disponíveis para efectuar os ensaios e possíveis de instalar no nosso sistema:

- IPE 100 S235;
- IPE220 S235;
- SHS 100*100*4 S235;
- CHS 101,6*4,05 S235;
- LNP 100*50*8 S275.

Objectivos:

- Calcular capacidade resistente das secções com as seguintes características:

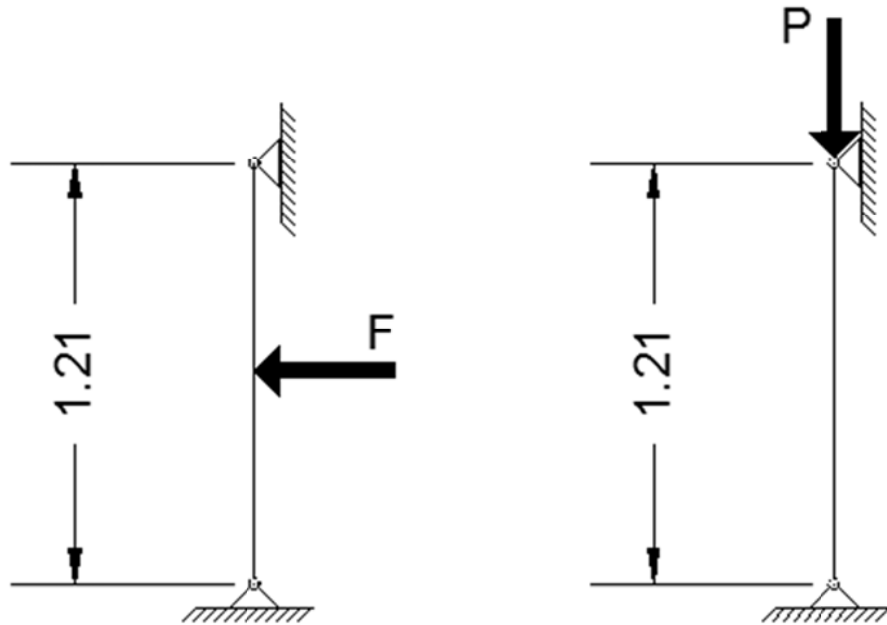
- Tipo de utilização:

- ✓ Temperatura ambiente (20°C);
- ✓ Grau de utilização de 70% (525,78°C*);
- ✓ Grau de utilização de 50% (584,67°C*);
- ✓ Grau de utilização de 30% (663,78°C*);

* à frente mostrarei como calcular esta temperatura relativamente ao grau de utilização a que está sujeito o elemento.

- Tipo de carga:

- ✓ Carga axial, efectuando uma análise ao elemento do tipo coluna, susceptível de provocar encurvadura por compressão da secção nos elementos a testar;
- ✓ Carga a meio vão, sendo uma análise ao elemento do tipo viga, provocando uma plastificação por flexão ou encurvadura lateral torsional da secção do elemento a testar.



Características do material:

Segundo ponto 3.2.6 do eurocódigo 3 1-1, temos:

- Módulo de elasticidade do aço:

$$E = 210\,000\text{ N/mm}^2 (=) 210\,000\text{ MPa} (=) \\ 210\,000\,000\text{ kPa} (=) 210\,000\,000\text{ kN/m}^2$$

- Módulo de distorção:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \vartheta)}$$

Onde:

- Coeficiente de poisson:

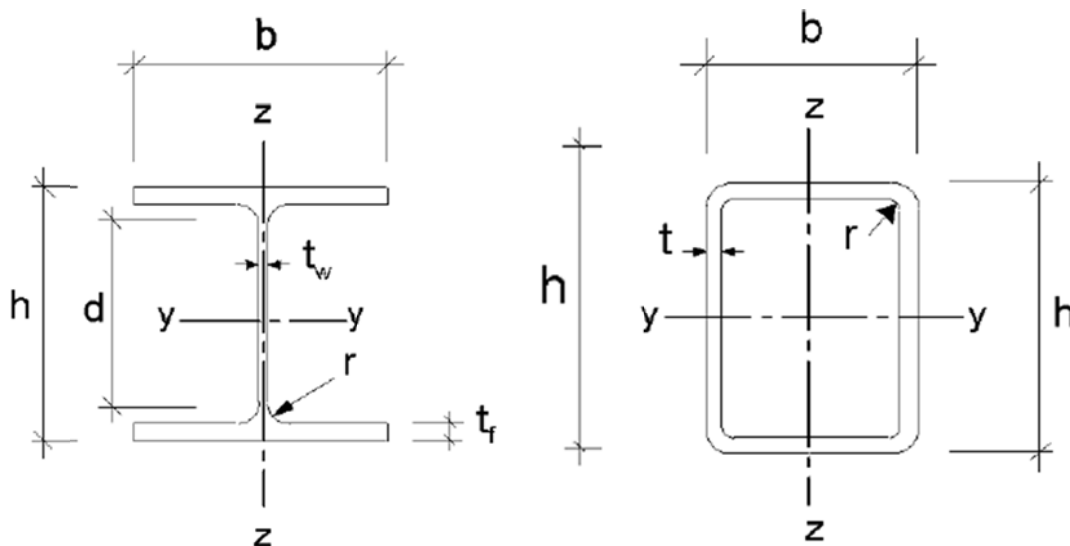
$$\vartheta = 0,3$$

Logo:

$$G = \frac{210\,000\,000}{2 * (1 + 0,3)} = 80\,769\,230.77\text{ kPa}$$

Convenção dos eixos:

Pelo eurocódigo, segue-se a seguinte convenção a tomar dos eixos nas secções:



A considerar que na convenção, os eixos referem-se a:

- $x - x$ -eixo longitudinal da peça;
- $y - y$ -eixo geométrico da secção transversal paralelo aos banzos;
- $z - z$ -eixo geométrico da secção transversal perpendicular aos banzos;
- $u - u$ -eixo principal de maior resistência em secções assimétricas;
- $v - v$ -eixo principal de menor resistência em secções assimétricas.

Nota: Numa peça de dupla simetria os eixos geométricos coincidem com os eixos principais

Classificação das secções

A classificação das secções é feita de acordo com o ponto 5.5 do eurocódigo 3 1-1, para situações de temperatura ambiente (20°C). Para situações de ensaios a temperaturas elevadas, esta classificação é feita com base no ponto 4.2.2 do eurocódigo 3 1-2.

Tipos de classes

- Classe 1;
- Classe 2;
- Classe 3;
- Classe 4.

A considerar:

- As secções deveram ser classificadas num global de acordo com a maior das classes tomadas pela alma ou banzos considerando assim a situação mais desfavorável (ponto 5.5.2 (6));
- Todas as secções deverão ter em consideração os parâmetros da tabela 5.2 do eurocódigo 3 1-1. As secções que não satisfaçam as condições da classe 1, 2 e 3, deveram ser consideradas como de classe 4 (ponto 5.5.2 (8));
- Coeficiente relativo à tensão da cedência (tabela 5.2):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

- Para condições de fogo, este coeficiente passa a ser (ponto 4.2.2 EC3 1-2):

$$\varepsilon_{fi} = 0,85 * \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

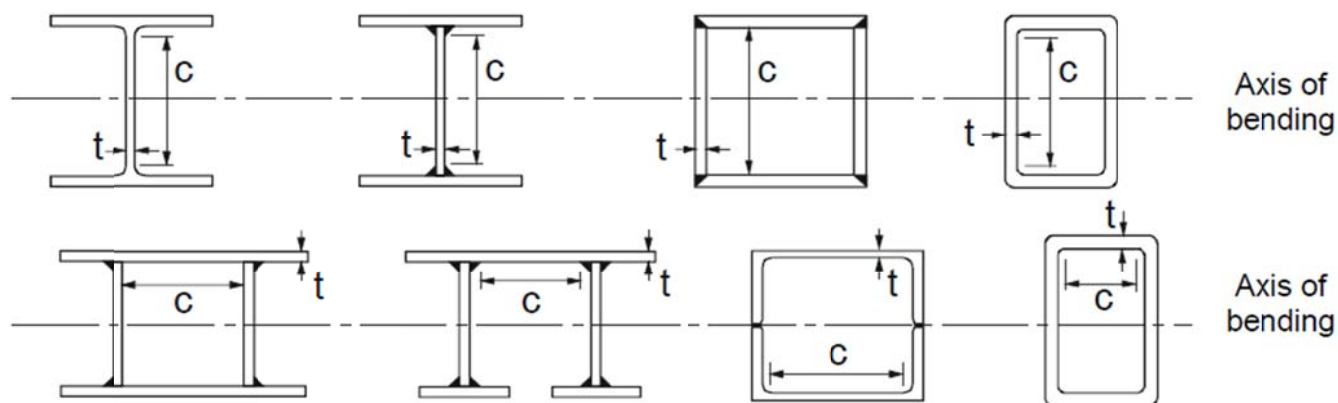
Onde f_y é o valor da tensão de cedência da secção:

Para S235: $-f_y = 235 \frac{N}{mm^2} (=) 235000 \text{ kpa}$, $\varepsilon = 1,00$, $\varepsilon_{fi} = 0,85$

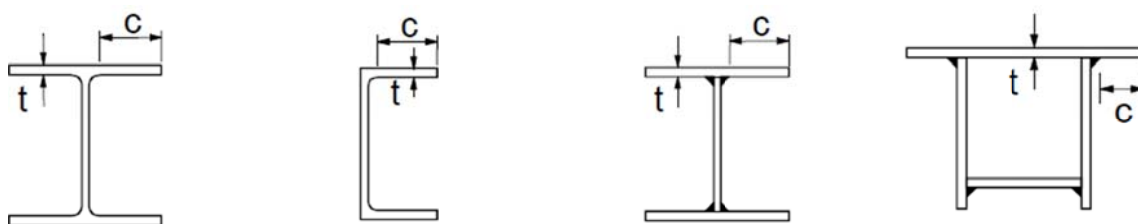
Para S275: $-f_y = 275 \frac{N}{mm^2} (=) 275000 \text{ kpa}$, $\varepsilon = 0,92$, $\varepsilon_{fi} = 0,782$

- Dimensões a considerar (tabela 5.2):

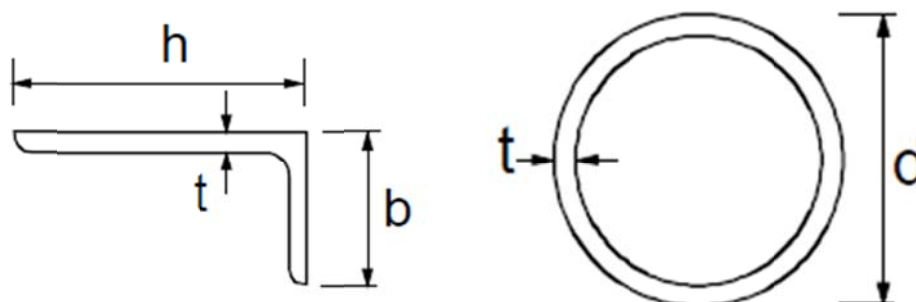
Elementos internos:



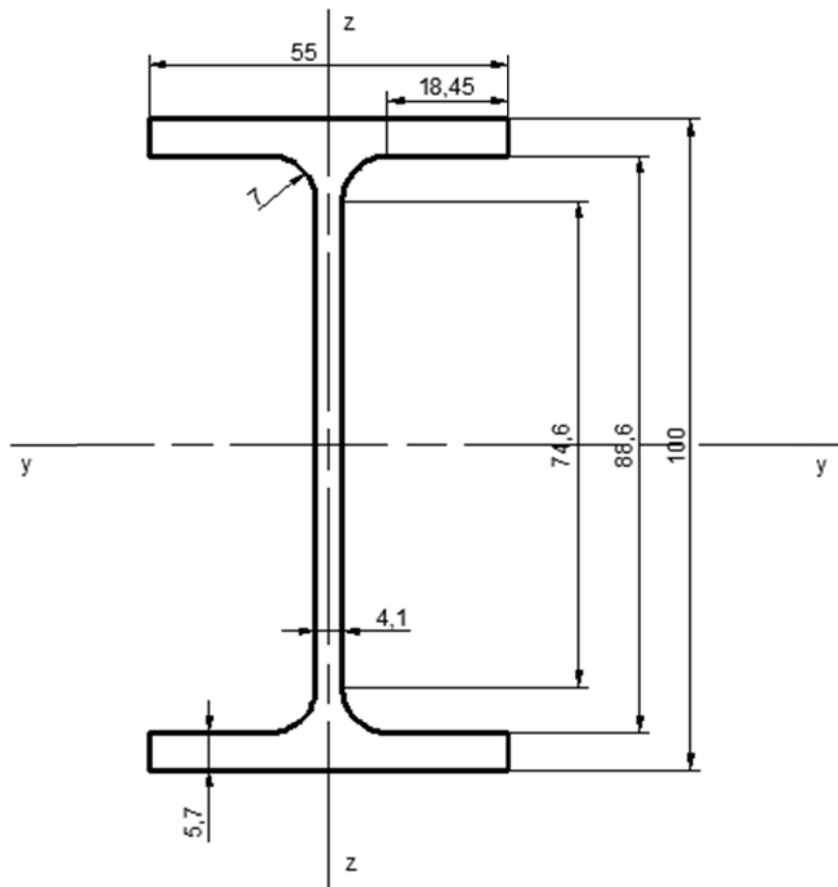
Elementos externos:



Cantoneiras e tubos:



IPE100 S235



- Situação da secção à compressão.

➤ À temperatura ambiente:

- ✓ Classificação da alma:

$$\frac{c}{t} = \frac{74,6}{4,1} = 18,195$$

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 33$$

$$18,195 \leq 33 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 1}$$

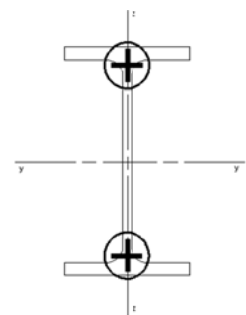
- ✓ Classificação dos banzos:

$$\frac{c}{t} = \frac{18,45}{5,7} = 3,237$$

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 9$$



$$3,237 \leq 9 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a compressão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

✓ Classificação da alma:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 28,05$$

$$18,195 \leq 28,05 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação dos banzos:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 7,65$$

$$3,237 \leq 7,65 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à compressão sobe condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 1**.

• Situação da secção à flexão.

➤ À temperatura ambiente:

✓ Classificação da alma:

$$\frac{c}{t} = \frac{74,6}{4,1} = 18,195$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 72$$

$$18,195 \leq 72 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação dos banzos:

$$\frac{c}{t} = \frac{18,45}{5,7} = 3,237$$

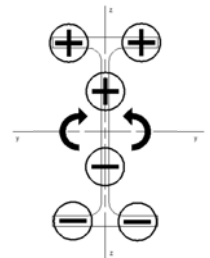
▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 9$$

$$3,237 \leq 9 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a flexão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.



➤ Em condições de fogo:

✓ Classificação da alma:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 61,2$$

$$18,195 \leq 62,05 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação dos banzos:

▪ Classe 1:

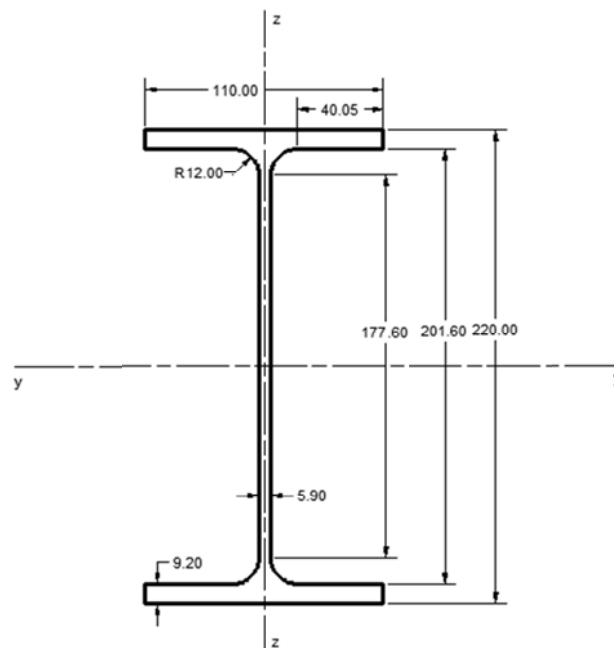
$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 7,65$$

$$3,237 \leq 7,65 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à compressão sobe condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 1**.

IPE220 S235



• Situação da secção à compressão.

➤ À temperatura ambiente:

✓ Classificação da alma:

$$\frac{c}{t} = \frac{177,6}{5,9} = 30,1$$

▪ Classe 1:

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 33$$

$$30,1 \leq 33 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação dos banzos:

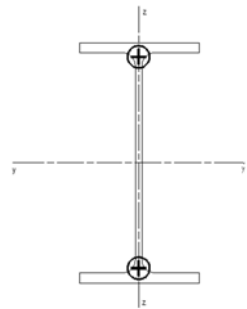
$$\frac{c}{t} = \frac{40,05}{9,2} = 4,35$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 9$$

$$4,35 \leq 9 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$



Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a compressão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

✓ Classificação da alma:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 28,05$$

$$30,1 \leq 28,05 \Rightarrow K.O. \Rightarrow \text{verificar classe seguinte}$$

▪ Classe 2:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$$

$$38 * \varepsilon = 32,3$$

$$30,1 \leq 32,3 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 2}$$

✓ Classificação dos banzos:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 7,65$$

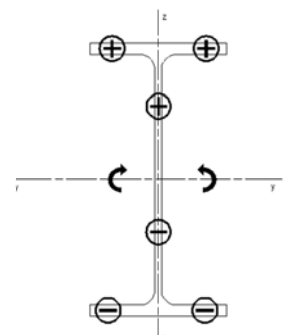
$$4,35 \leq 7,65 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à compressão sobe condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 2**.

• Situação da secção à flexão.

➤ À temperatura ambiente:

✓ Classificação da alma:



$$\frac{c}{t} = \frac{177,6}{5,9} = 30,1$$

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 72$$

$$30,1 \leq 72 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

- ✓ Classificação dos banzos:

$$\frac{c}{t} = \frac{40,05}{9,2} = 4,35$$

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 9$$

$$4,35 \leq 9 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a flexão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.

- Em condições de fogo:

- ✓ Classificação da alma:

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 61,2$$

$$30,1 \leq 61,2 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

- ✓ Classificação dos banzos:

- Classe 1:

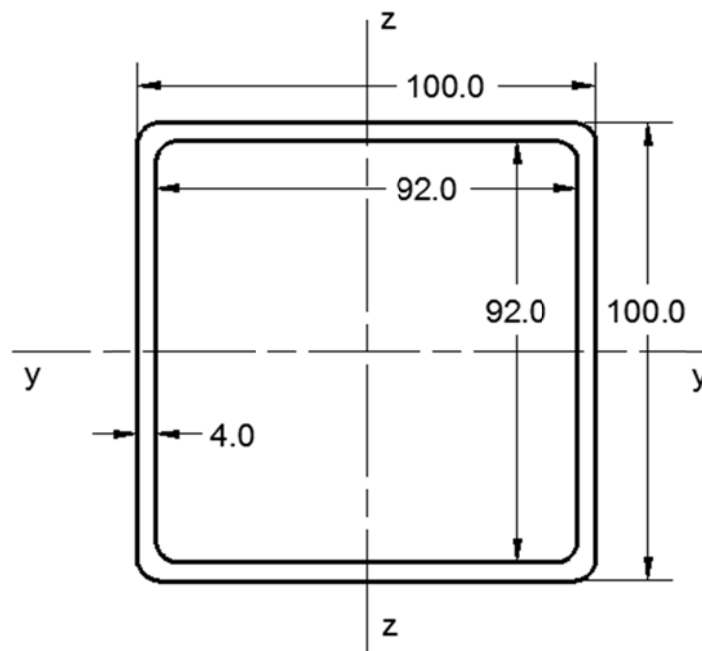
$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 7,65$$

$$4,35 \leq 7,65 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à compressão sobe condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 1**.

SHS 100x100x4 S235



- Situação da secção à compressão.

➤ À temperatura ambiente:

$$\frac{c}{t} = \frac{92}{4} = 23$$

- Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 33$$

$$23 \leq 33 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Esta secção classifica-se, quando sujeita a compressão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

- Classe 1:

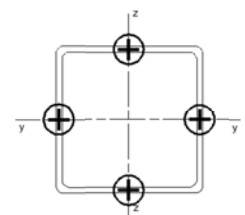
$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$33 * \varepsilon = 28,05$$

$$23 \leq 28,05 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Esta secção classifica-se, quando sujeita à compressão sob condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 1**.

- Situação da secção à flexão.



➤ À temperatura ambiente:

✓ Parte sujeita à flexão:

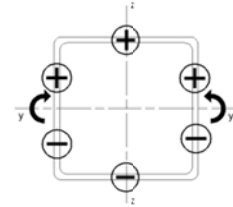
$$\frac{c}{t} = \frac{92}{4} = 23$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 72$$

$$23 \leq 72 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$



✓ Parte sujeita à compressão:

Já visto no ponto anterior => **Classe 1**

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a flexão à temperatura ambiente, como sendo globalmente de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

✓ Parte sujeita à flexão:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72 * \varepsilon = 61,2$$

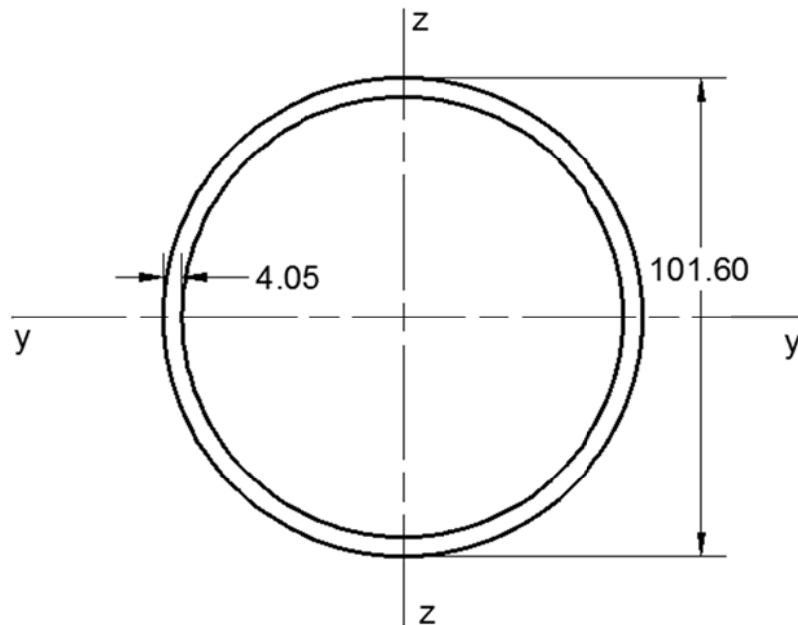
$$23 \leq 61,2 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Parte sujeita à compressão:

Já visto no ponto anterior => **Classe 1**

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita a flexão sob condições de fogo, como sendo globalmente de **classe 1**.

CHS 101,6x4,05 S235



- Situação da secção à compressão e flexão.

➤ À temperatura ambiente:

$$\frac{d}{t} = \frac{101,6}{4,05} = 25,086$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{d}{t} \leq 50\varepsilon$$

$$50 * \varepsilon = 50$$

$$25,086 \leq 50 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Esta secção à temperatura ambiente classifica-se como sendo de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

▪ Classe 1:

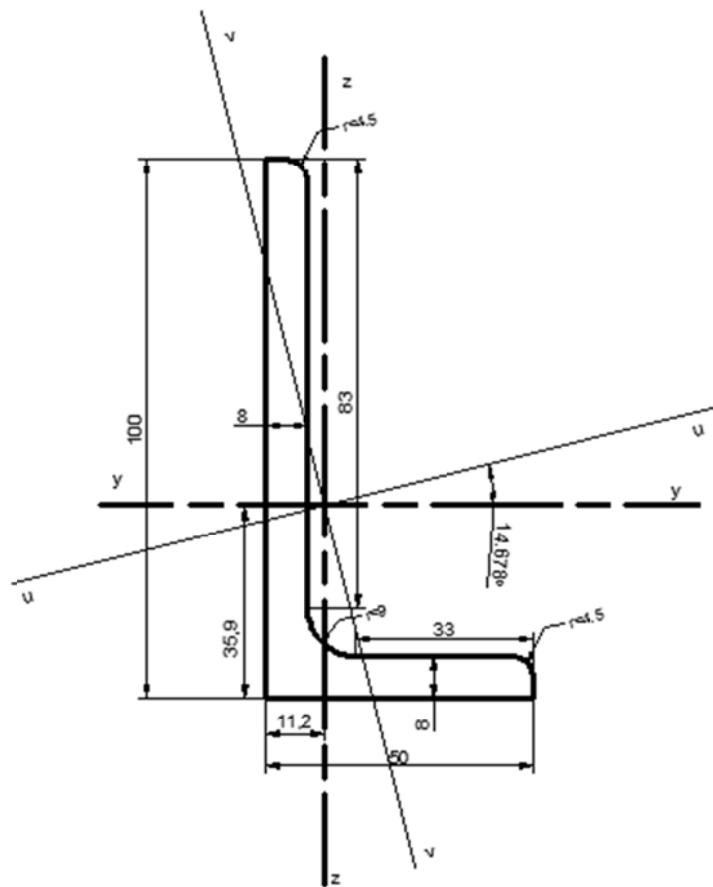
$$\text{Condição: } \frac{d}{t} \leq 50\varepsilon$$

$$50 * \varepsilon = 42,5$$

$$25,086 \leq 42,5 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Esta secção sob condições de fogo classifica-se como sendo de **classe 1**.

LNP 100x50x8 S275



- Situação da secção à compressão.

➤ À temperatura ambiente:

$$\frac{h}{t} = \frac{100}{8} = 12,5$$

$$\frac{b+h}{2*t} = \frac{50+100}{2*8} = 9,38$$

▪ Classe 3:

$$\text{Condição: } \frac{h}{t} \leq 15\varepsilon$$

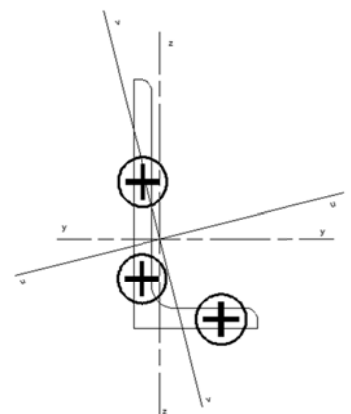
$$15 * \varepsilon = 13,8$$

$$12,5 \leq 13,8 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 3}$$

$$\text{Condição: } \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$$

$$11,5 * \varepsilon = 10,58$$

$$9,38 \leq 10,58 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 3}$$



RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Logo esta secção, em condições de temperatura ambiente, classifica-se como sendo de **classe 3**.

➤ Em condições de fogo:

▪ Classe 3:

$$\text{Condição: } \frac{h}{t} \leq 15\varepsilon$$

$$15 * \varepsilon = 11,73$$

$$12,5 \leq 11,73 \Rightarrow \text{K.O.} \Rightarrow \text{Classe 4}$$

$$\text{Condição: } \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$$

$$11,5 * \varepsilon = 8,99$$

$$9,38 \leq 8,99 \Rightarrow \text{K.O.} \Rightarrow \text{Classe 4}$$

Logo esta secção, sob condições de fogo, classifica-se como sendo de **classe 4**.

- Situação da secção à flexão.

Aqui verifiquei como sendo partes das extremidades (banzos) (folha 2 da tabela 5.2).

➤ À temperatura ambiente:

✓ Classificação do banzo à flexão:

Com a extremidade tracionada.

$$\frac{c}{t} = \frac{83}{8} = 10,375$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$$

$$\frac{9 * \varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}} = \frac{9 * 0,92}{0,2277 * \sqrt{0,2277}} = 76,21$$

$$10,375 \leq 76,21 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação do banzo comprimido:

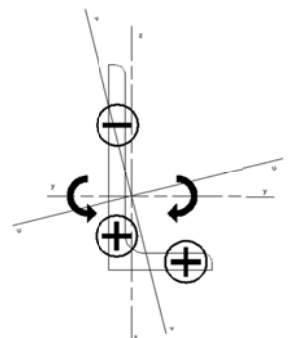
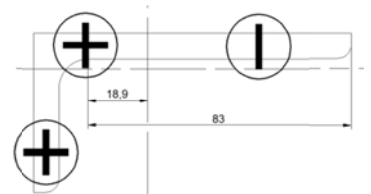
$$\frac{c}{t} = \frac{33}{8} = 4,125$$

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9 * \varepsilon = 8,28$$

$$4,125 \leq 8,28 \Rightarrow \text{O.K.} \Rightarrow \text{Classe 1}$$



Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à flexão, como

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

sendo globalmente de **classe 1**.

➤ Em condições de fogo:

✓ Classificação do banzo à flexão:

Com a extremidade tracionada.

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq \frac{9 \cdot \varepsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$$

$$\frac{9 \cdot \varepsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}} = \frac{9 \cdot 0,78}{0,2277 \cdot \sqrt{0,2277}} = 64,775$$

$$10,375 \leq 64,775 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

✓ Classificação do banzo comprimido:

▪ Classe 1:

$$\text{Condição: } \frac{c}{t} \leq 9 \varepsilon$$

$$9 \cdot \varepsilon = 7,038$$

$$4,125 \leq 7,038 \Rightarrow O.K. \Rightarrow \text{Classe 1}$$

Logo esta secção classifica-se, quando sujeita à flexão, como sendo globalmente de **classe 1**.

Resumo das classificações

Condição	Secção	IPE 100 S235	IPE 220 S235	SHS 100x100x4 S235	CHS 101,6x4,05 S235	LNP 100x50x8 S275
Temperatura ambiente	Compressão	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 3
	Flexão	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Ao fogo	Compressão	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 1	Classe 4
	Flexão	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1

Características das secções

As características das secções, necessárias para o cálculo das capacidades resistentes, foram recolhidas em tabelas de fornecedores, à

excepção de algumas que não se encontraram.

Passo a explicar como obtive as características que eram omissas:

LNP 100x50x8

Uma aproximação dos valores da constante de torção e constante de empenamento é mostrada num documento do Canadian Institute of Steel Construction 2002, com as seguintes expressões:

Constante de torção:

$$I_t = (b^* + d^*) * \frac{t^3}{3}$$

Constante de empenamento:

$$I_t = (b^{*3} + d^{*3}) * \frac{t^3}{36}$$

Onde:

$$b^* = b - \frac{t}{2}$$

$$d^* = d - \frac{t}{2}$$

b é o banzo menor;

d é o banzo maior;

t é a espessura da secção.

Os módulos de resistência à flexão apresentados nas tabelas dos fornecedores, referem-se a módulos elásticos, para determinar os módulos plásticos da secção, fiz uso do programa Shape Designer (Mecha Tools), com uma aproximação da secção transversal a 2 formas rectangulares de 100x8 e 42x8.

Resumo das características

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Característica	IPE 100	IPE 220	SHS 100x100x4	CHS 101,6x4,05	LNP 100x500x8
Área (m ²)	1,03e-3	3,34e-3	1,53e-3	1,21e-3	1,14e-3
I _y (m ⁴)	1,71e-6	2,77e-5	2,34e-6	1,45e-6	1,16e-6
I _z (m ⁴)	1,59e-7	2,05e-6	2,34e-6	1,45e-6	1,95e-7
I _y (m ⁴)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,27e-7
I _u (m ⁴)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,23e-6
I _t (m ⁴)	1,2e-8	9,07e-8	n.a.	n.a.	2,42e-8
I _w (m ⁶)	3,5e-16	2,27e-14	n.a.	n.d.	1,4e-11
W _{el,y} (m ³)	3,42e-5	2,52e-4	4,68e-5	2,85e-5	1,81e-5
W _{el,z} (m ³)	5,79e-6	3,73e-5	4,68e-5	2,85e-5	5,04e-6
W _{el,v} (m ³)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	4,29e-6
W _{el,u} (m ³)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,9e-5
W _{pl,y} (m ³)	3,94e-5	2,85e-4	5,49e-5	3,78e-5	n.a.
W _{pl,z} (m ³)	9,15e-6	5,81e-5	5,49e-5	3,78e-5	n.a.
W _{pl,v} (m ³)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,51e-5
W _{pl,u} (m ³)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	3,05e-5
i _y (m)	0,0407	0,0911	0,039	0,0345	0,0318
i _z (m)	0,0124	0,0248	0,039	0,0345	0,0131
i _v (m)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0105
i _u (m)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,0328

*n.a. – não aplicável ou sem relevância ao nosso problema.

Cálculo do grau de utilização

Para determinar a temperatura crítica para os graus de utilização pretendidos para o estudo, o eurocódigo 3 1-2, ponto 4.2.4 (2), devolve uma expressão que permite estabelecer temperatura crítica em função do grau de utilização:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 * \ln \left[\frac{1}{0,9674 * \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

Em que μ_0 é o grau de utilização que pretendemos trabalhar.

No nosso caso iremos estudar as condições de utilização com graus de 30%, 50% e 70%, logo os valores de temperatura crítica iram ser determinados pela expressa anterior e tomam os seguintes valores:

Grau de utilização (μ_0)	Temperatura crítica ($\theta_{a,cr}$) (°C)
0,3	663,78
0,5	584,67
0,7	525,78

Capacidade plástica resistente das secções por carga de compressão.

Numa verificação plástica de resistência de uma secção sujeita a compressão uniforme, o eurocódigo 3 1-1 ponto 6.2.4 (1) diz que deve ser cumprida a seguinte condição:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Entende-se que:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$$

Em que:

N_{Ed} é a força de compressão actuante;

$N_{c,Rd}$ é a resistência plástica da secção e calcula-se por:

$$N_{c,Rd} = A * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classes 1, 2 e 3}$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classe 4}$$

A é a área da secção transversal;

A_{eff} é a área efectiva de cálculo para secções de classe 4, e deve ser determinada segundo o eurocódigo 3 1-5;

f_y é o valor da tensão de cedência do aço;

γ_{M0} é o factor de parcial de segurança para dimensionamento de secções;

Os factores parciais de segurança devem ser tomados segundo o ponto 6.1 do eurocódigo 3 1-1 com os seguintes valores:

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Resumo das resistências plásticas à compressão.

Secção	Resistência $N_{c,Rd}$ (kN)
IPE 100	242,05
IPE 220	784,2
SHS 100x100x4	359,55
CHS 101,6x4,05	284,35
LNP 100x50x8	313,5

Capacidade plástica das secções por carga de flexão.

À temperatura ambiente.

Considerando uma situação de pura flexão do elemento, sem ter em conta nenhum fenómeno de instabilidade, o eurocódigo3 1-1 diz que deve ser cumprida a seguinte condição (ponto 6.2.5), para uma situação de temperatura ambiente:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Entende-se que:

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$$

Em que:

M_{Ed} é a força de compressão actuante;

$M_{c,Rd}$ é a resistência plástica da secção e calcula-se por:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classes 1 e 2}$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el,min} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classe 3}$$

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classe 4}$$

W_{pl} é o módulo de resistência plástica à flexão;

$W_{pl,min}$ é o módulo de resistência à flexão na fibra mais tensionada da secção transversal;

$W_{eff,min}$ é o módulo de resistência à flexão efectivo de cálculo para secções de classe 4, e deve ser determinada segundo o eurocódigo 3 1-5;

f_y é o valor da tensão de cedência do aço;

Em condições de incêndio.

Para condições de incêndio, uma viga à flexão deve ter em conta o eurocódigo 3 1-2, ponto 4.2.3.3 (1), e deve ser substituída a resistência da secção à temperatura ambiente pela expressão:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} * \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right] * M_{Rd}$$

Em que:

M_{Rd} é igual ao momento resistente plástico de uma secção exposta à temperatura ambiente ($M_{c,Rd}$);

$\gamma_{M,fi}$ é o factor parcial de segurança, relativamente a condições de fogo, e é tomado como 1,0;

$\gamma_{M,0}$ já definido no ponto anterior;

$k_{y,\theta}$ é um factor de redução da tensão de cedência do aço em condições de incêndio, que no nosso caso toma os seguintes valores:

Temperatura ($\theta_{a,cr}$) (°C)	Factor redutivo da tensão de cedência ($k_{y,\theta}$)
663,78	0,317
584,67	0,518
525,78	0,7

Este factor de redução ($k_{y,\theta}$) é calculado pela interpolação directa dos valores fornecidos no eurocódigo 3 1-2 tabela 3.1.

Resumo das resistências plásticas á flexão

O sentido da carga irá ser sempre direccionado paralelamente ao eixo de menor resistência, pois só assim faz sentido a aplicação dessa mesma carga.

Devido á dificuldade de colocar a carga no sentido perpendicular ao eixo de maior resistência (u-u), na secção LNP, ela irá estar efectivamente perpendicular ao eixo mais próximo (y-y) que é perpendicular a uma das superfícies e assim sendo, torna-se mais fácil a aplicação da carga, mas para efeitos de resistência plástica vou considerar o eixo (u-u) como o resistente.

Secção	$M_{c,Rd}$ (kN.m)	$M_{fi,\theta,Rd}$ (kN.m)		
		$\mu_0=0,3$	$\mu_0=0,5$	$\mu_0=0,7$
IPE 100	9,26	2,94	4,79	6,48
IPE 220	67,07	21,26	34,71	46,95
SHS 100x100x4	12,9	4,09	6,68	9,03
CHS 101,6x4,05	8,88	2,82	4,6	6,22
LNP 100x50x8 (u-u)	8,44	2,68	4,37	5,91

Resistência à instabilidade das secções por carga de compressão.

À temperatura ambiente.

Um elemento do tipo coluna, só com carga axial de compressão, sem travamentos laterais, deve ser dimensionado à instabilidade por compressão do tipo Buckling. Pelo eurocódigo 3 1-1 ponto 6.3.1.1, a seguinte condição deve ser garantida no dimensionamento:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Entende-se que:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$$

Entenda-se também que esta condição é igual à condição de uma peça à resistência plástica por compressão, alterando o valor de N_{Rd} pelo novo $N_{b,Rd}$, que agora contabiliza a instabilidade do tipo buckling numa coluna comprimida.

Então $N_{b,Rd}$ toma-se por:

$$N_{b,Rd} = \chi * A * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \text{ para secções de classes 1, 2 e 3}$$

$$N_{b,Rd} = \chi * A_{eff} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções de classe 4}$$

Nestas expressões acrescenta um parâmetro χ , que actua como um factor redutor da resistência da peça à compressão. Para uma situação de diferentes condições de apoio nas várias direcções do elemento, teríamos de verificar a encurvadura em torno de todos os eixos, mas como no nosso problema as condições de apoio serão iguais em todas as direcções, o factor predominante na instabilidade será o eixo de menor inércia. O parâmetro χ determina-se por:

$$\chi = \frac{1}{[\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}]} \leq 1$$

Onde:

$$\Phi = \frac{1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2}{2}$$

$$\lambda = \sqrt{A * \frac{f_y}{N_{cr}}} \text{ para secções de classes 1, 2 e 3}$$

$$\lambda = \sqrt{A_{eff} * \frac{f_y}{N_{cr}}} \text{ para secções de classe 4}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{l_e^2} \text{ (carga de Euler)}$$

E é o módulo de deformabilidade do material;

I é o momento de inércia do eixo mais fraco;

l_e é o comprimento efectivo de encurvadura;

α é o factor de imperfeição determinado pelas tabelas 6.1e 6.2 do eurocódigo 3 1-1, que nas nossas secções têm o valor de:

Secções/eixos	y-y	z-z	v-v	u-u
IPE 100	0,21	0,34	n.a.	n.a.
IPE 220	0,21	0,34	n.a.	n.a.
SHS 100x100x4	0,49	0,49	n.a.	n.a.
CHS 101,6x4,05	0,49	0,49	n.a.	n.a.
LNP 100x50x8	0,34	0,34	0,34	0,34

n.a. – não aplicável.

Podendo também usar uma formulação derivada da simplificação das formulas anteriores (formulação antiga do eurocódigo):

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} * \sqrt{\beta_a}$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\lambda = \frac{l_e}{i}$$

Em que:

β_a é um coeficiente tomado pelo valor de 1;

i é o raio de giração no eixo mais fraco.

Em condições de fogo.

Sobre condições de incêndio, fiz uso do eurocódigo 3 1-2 ponto 4.2.3.2, em que $N_{b,Rd}$ á temperatura ambiente é substituído por um $N_{b,fi,t,Rd}$ que se determina por:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} * A * k_{y,\theta} * \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \text{ para classes 1, 2 e 3}$$

Onde:

χ_{fi} é o factor de redução devido ao efeito da encurvadura em condições de incêndio;

$k_{y,\theta}$ é o factor de redução da tensão de cedência do aço;

$\gamma_{M,fi}$ é o factor parcial de segurança relativamente a condições de incêndio.

χ_{fi} é determinado por:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \lambda_{\theta}^2}}$$

Onde:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1 + \alpha * \lambda_{\theta} + \lambda_{\theta}^2}{2}$$

$$\alpha = 0,65 * \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\lambda_{\theta} = \lambda * \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}$$

λ é o factor adimensional de esbelteza obtido á temperatura ambiente;

$k_{E,\theta}$ é um factor de redução da linearidade elástica dependente da temperatura, definido na tabela 3.1 do eurocódigo 3 1-2, tomado por:

Temperatura ($\theta_{a,cr}$) (°C)	Factor redutivo da linearidade elástica ($k_{E,\theta}$)
663,78	0,195
584,67	0,354
525,78	0,525

Para secções de classe 4, o ponto 4.2.3.6 do eurocódigo 3 1-2, afirma poder-se fazer uso das formulas anteriores, substituindo o factor redutivo da tensão de cedência do aço por um novo factor ($k_{p0,2,\theta}$) definido no anexo E do mesmo eurocódigo, e também substituindo a área da secção, por uma área efectiva, calculada de acordo com o eurocódigo 3 1-5.

Os valores de $k_{p0,2,\theta}$ estão definidos no eurocódigo 3 1-2 anexo E, e tomam os seguintes valores, no nosso problema:

Temperatura ($\theta_{a,cr}$) (°C)	Factor redutivo ($k_{p0,2,\theta}$)
663,78	0,192
584,67	0,335
525,78	0,471

O valor da área efectiva de uma peça á compressão calcula-se de acordo com o eurocódigo 3 1-5 ponto 4.4, e é tomada como:

$$A_{c,eff} = \rho * A_c$$

Onde:

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

A_c é a área da secção transversal;

ρ é o factor redutivo da área de secção.

O valor de ρ é determinado por:

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \text{ para elementos externos}$$

Onde:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\frac{b}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}}$$

b é igual ao valor de h nas nossa secção de classe 4, LNP;

t é o valor da espessura;

k_σ é o valor do factor de buckling correspondente á distribuição de tensões na secção transversal.

No nosso caso, a distribuição de tensões na secção transversal, numa situação de compressão total da secção, irá ser toda ela igual, logo o valor de k_σ é tomado por 0,43 segundo tabela 4.2 do eurocódigo 3 1-5.

Conclui-se que a área efectiva da nossa secção, irá ser igual á área que a secção do elemento contém, logo não haverá redução da área á compressão no LNP à compressão numa situação de incêndio. Apenas irá haver uma redução do factor da tensão de cedência do aço, já visto anteriormente, o que vai de acordo as referências bibliográficas (Franssen), afirma que as secções em que à temperatura ambiente encontram-se numa classe 3, em condições de fogo caiem para classe 4, não havendo uma redução da secção na maioria dos casos, mas sim uma redução da tensão de cedência do aço.

Então pela análise do eurocódigo o valor de N_{Rd} irá ser calculado agora por:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} * A * k_{p0,2,\theta} * \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \text{ para classe 4}$$

Onde:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \lambda_\theta^2}}$$

$$\varphi_{\theta} = \frac{1 + \alpha * \lambda_{\theta} + \lambda_{\theta}^2}{2}$$

$$\alpha = 0,65 * \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\lambda_{\theta} = \lambda * \left[\frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \text{ para classe 4}$$

Contudo esta formulação não é apresentada no eurocódigo, apenas é descrito o procedimento, o que a sua interpretação pode por vezes levar a outras soluções. Na minha opinião o eurocódigo deveria introduzir a formulação exacta do entendimento que é descrito no anexo E (eurocódigo 3 1-2), para secções de classes 4 ao fogo.

Resumo das resistências por instabilidade à compressão.

Secção	$N_{b,Rd}$ (kN)	$N_{b,fi,t,Rd}$ (kN)		
		$\mu_0=0,3$	$\mu_0=0,5$	$\mu_0=0,7$
IPE 100	138,54	25,26	44,15	63,16
IPE 220	686,51	155,96	262,25	363,15
SHS 100x100x4	335,82	86,64	143,7	196,82
CHS 101,6x4,05	259,11	65,75	109,36	150,12
LNP 100x50x8 (u-u)	136,99	20,5	80,98	114,58

Resistência à instabilidade por carga de flexão.

À temperatura ambiente

Uma viga, carregada, sem restrições laterais, pode estar sujeita a fenómenos de instabilidade, “lateral torcional Buckling”, encurvadura lateral torsional, que se forma momentos antes de atingir a sua deformação por plasticidade da secção. No ponto 6.3.2.1 do eurocódigo 3 1-1, convencionou-se que o M_{Rd} de uma viga passa a designar-se por $M_{b,Rd}$, e determina-se por por:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Em que:

χ_{LT} é factor redutor devido ao efeito de instabilidade lateral torsional;

W_y é igual ao modulo plástico de resistência á flexão para secções 1 e 2, para secções de classe 3 deve ser tomado o modulo elástico, e para secção de classe 4 deve ser tomado o modulo efectivo;

f_y é a tensão de cedência do aço;

γ_{M1} é o factor parcial de segurança para dimensionamento.

Para o caso de secções enformadas, tais como IPE e HEB, ou secções soldadas equivalentes, ponto 6.3.2.3 do eurocódigo 3 1-1, o valor de χ_{LT} deve ser tomado como:

$$\chi_{Lt} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{Lt} \leq 1,0 \\ \chi_{Lt} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

e

$$\Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}{2}$$

Onde:

α_{LT} é um factor de imperfeição e depende da tabela 6.5 do mesmo eurocódigo, e nos nossos casos toma o valor de 0,34;

β pode-se tomar como valor mínimo de 0,75;

$\bar{\lambda}_{LT,0}$ toma-se como valor máximo de 0,4;

$\bar{\lambda}_{LT}$ é o factor adimensional de esbelteza, e determina-se por:

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

M_{cr} será o momento critico elástico, explicado mais adiante como irá ser obtido para as diferentes secções.

Ainda o valor de χ_{LT} a usar na equação de $M_{b,Rd}$ deverá ser substituído por um $\chi_{LT,mod}$ que terá em conta a distribuição de momentos ao longo da viga. E deverá ser tomado por:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2,0 * (\chi_{LT} - 0,8)^2] \text{ mas } f \leq 1,0$$

E k_c é determinado de acordo com a tabela 6.6 do mesmo eurocódigo, que no nosso caso tomará um valor de 0,86.

Para secções do tipo ocas, como SHS e CHS, o ponto 6.3.2.1(2) do eurocódigo 3 1-1, explica que estes elementos não estão susceptíveis deste tipo de fenómenos de instabilidades, o que se justifica por os eixos de inércia serem iguais, e assim não existir um eixo fraco e outro forte.

Para a secção LNP, o valor de χ_{LT} deve ser determinado pelo ponto 6.3.2.2 do eurocódigo 3 1-1, e toma-se por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1,0$$

e

$$\Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2}{2}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{W_y * \frac{f_y}{M_{cr}}}$$

Em que:

α_{LT} é o factor de imperfeição, determinado pela tabela 6.3 e 6.4 do mesmo eurocódigo, que para a nossa secção, LNP, toma o valor de 0,76.

M_{cr} será o momento critico elástico, que no ponto mais á frente demonstro como se determina.

Em condições de incêndio.

Para verificar a resistência à instabilidade por encurvadura lateral torsional de uma viga não restringida lateralmente o eurocódigo 3 1-2 diz que $M_{fi,\theta,Rd}$ deve ser substituído por $M_{b,fi,t,Rd}$, e deve ser determinado por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} * W_{pl,y} * k_{y,\theta,com} * \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Em que:

$\chi_{LT,fi}$ é o factor de redução em condições de fogo, por efeito de instabilidade lateral torsional;

$k_{y,\theta,com}$ é o factor de redução da capacidade resistente do aço á temperatura do teste, já referido anteriormente;

O valor de $\chi_{LT,fi}$ deve ser determinado por:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\Phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\Phi_{LT,\theta,com}^2 - \lambda_{LT,\theta,com}^2}}$$

e

$$\Phi_{LT,\theta,com} = \frac{1 + \alpha * (\lambda_{LT,\theta,com}) + \lambda_{LT,\theta,com}^2}{2}$$

$$\alpha = 0,65 * \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$\lambda_{LT,\theta,com} = \lambda_{LT} * \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}}$$

Onde:

λ_{LT} não é dito no eurocódigo, mas a única referência a este membro está na situação de temperatura ambiente, e é esse o valor que vou adoptar;

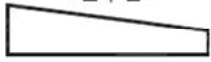


$k_{E,\theta,com}$ é um factor de redução da linearidade elástica dependente da temperatura, já definido anteriormente.

Vou experimentalmente ter em conta uma nova proposta apresentada por Paulo Vila Real, que define um novo $\chi_{LT,fi,mod}$, que entra na formulação do $M_{b,fi,t,Rd}$, substituindo o existente $\chi_{LT,fi}$. E $\chi_{LT,fi,mod}$ calcula-se por:

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \leq 1$$

Em que f depende das condições de carga:

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c)$$

Moment distribution	Class 1, 2, 3 sections k_c
$-1 \leq \psi \leq 1$ 	$0.6 + 0.3\psi + 0.15\psi^2$ but $k_c \leq 1$
Concentrated load 	0.79
Distributed load 	0.91

Note: for others bending diagrams $k_c = 1$.

Pela nova proposta então:

$$M_{b,fi,t,Rd,mod} = \chi_{LT,fi,mod} * W_{pl,y} * k_{y,\theta,com} * \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

Contudo esta formulação ainda não é regulamentar, por isso vou tê-la em conta, mas os valores de cálculo obtidos na formulação do eurocódigo é que iram ser os significativos em termos análise.

Cálculo do momento crítico.

Para o cálculo do momento crítico em vigas duplamente simétricas, caso dos IPE no nosso problema, utilizei uma formulação referida num eurocódigo 3 1-1 (1992), em que no anexo F ponto 1.3 (1), refere como calcular estes momentos críticos. Então M_{cr} formula-se por:

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(K * L)^2} * \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 * \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K * L)^2 * G * I_t}{\pi^2 * E * I_z} + [C_2 * z_g]^2 \right]^{0,5} - C_2 * z_g \right\}$$

Onde:

C_1 e C_2 estão tabelados (tabela F.1.2.), e são coeficientes devidos às condições de apoio e diagrama de momentos da secção;

I_z é o momento de inércia do eixo menos resistente;

I_w é a constante de torção;

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

l_t é a constante de empenamento;

K é o coeficiente redutor do comprimento efectivo e no nosso caso é 1;

z_g é a coordenada do ponto de aplicação da nossa carga, que irá ser metade de h da secção.

Tabela retirada do eurocódigo 3 1-1 (1992)

Loading and support conditions	Bending moment diagram	Values of k	Values of factors		
			C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Esta e outras formulações desse eurocódigo (1992), apenas são válidas para secções duplamente simétricas ou monossimétricas.

A abordagem do problema em secções assimétricas, no nosso caso a cantoneira LNP, é uma secção ainda pouco estudada em termos de comportamento como viga não restringida lateralmente. Existe contudo algumas referências a este assunto num livro do autor N.S.Trahair (1993) intitulado por “Flexural-Torsional Buckling of Structures”, que no capítulo 7, estuda vigas simplesmente suportadas. Nesse mesmo capítulo faz referência a vigas assimétricas, e diz que puderam ser tratadas, de acordo com as formulações do livro, como secções monossimétricas, calculando o respectivo valor de β_u , que é um parâmetro para secção não simétricas. De acordo então com as nossas condições, temos então:

$$M_{cr} = M_{vx} * \alpha_m * \left\{ \left[1 + \left(\frac{0,4 * \alpha_m * f_3 * \beta_u * P_v}{2 * M_{vx}} \right)^2 \right]^{0,5} + \frac{0,4 * \alpha_m * f_3 * \beta_u * P_v}{2 * M_{vx}} \right\}$$

Em que:

M_{vx} é o momento critico considerando a peça com dupla simétrica, formulada

por Trahair;

α_m é o coeficiente devido ao diagrama de momentos, que no nosso caso é igual a 1,35;

f_3 é igual a: $\frac{\pi^2}{8} - 1/2 \approx 0,73$;

β_u é uma propriedade da monossimetria das peças;

P_v é a carga de Euler.

Nota: Os eixos aqui usados para o cálculo e nomenclaturas, referem-se aos principais de inércia (u-u e v-v).

Para o cálculo de M_{vx} a formulação a adoptar é:

$$M_{vx} = \left\{ \frac{\pi^2 * E * I_v}{L^2} * \left[G * I_t + \frac{\pi^2 * E * I_w}{L^2} \right] \right\}^{0,5}$$

Todos os membros estão definidos anteriormente.

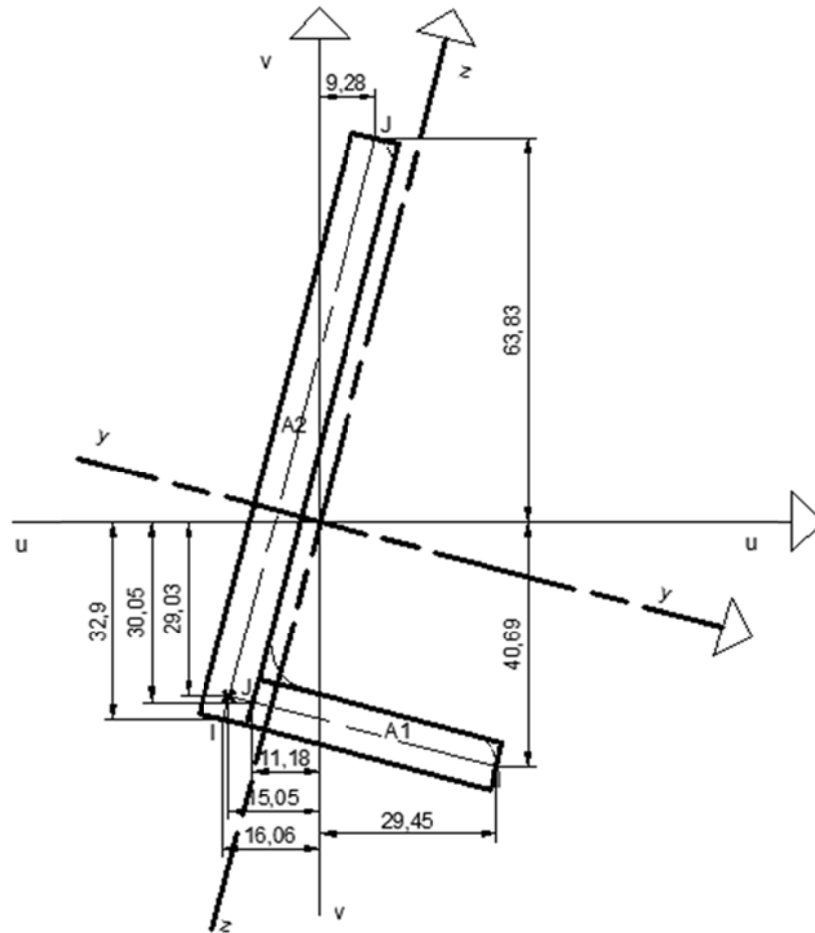
A carga de Euler P_v , também já foi referida anteriormente:

$$P_v = \frac{\pi^2 * E * I_v}{l_e^2}$$

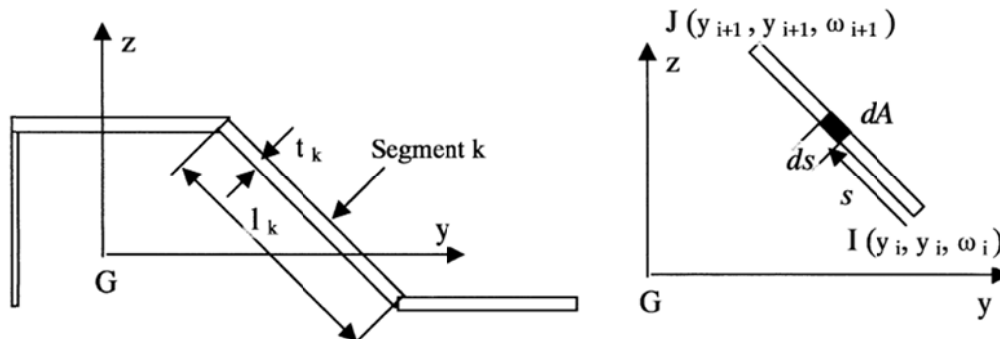
O parâmetro de definição da propriedade monossimétrica da peça β_u é definido por:

$$\beta_u = \frac{1}{I_u} * \int_A v * (u^2 + v) dA - 2 * v_0$$

Este parâmetro é particularmente complicado de calcular nas nossas secções, pois os eixos principais atravessam a secção, formando figuras não ordinárias:



Para tal houve necessidade de fazer novas pesquisas. Num documento intitulado de “Flexural-Torcional post-buckling analysis of thin-walled elements with open sections” de F.Mahri, L.Azrar, M.Potier-Ferry, encontram-se referências de cálculos de coeficientes de Wagner em secções não alinhadas com os seus eixos de referência. Como os coeficientes de Wagner contêm o integral que pretendemos obter, retiro assim as formulações aqui conseguidas e utilizo-as para o nosso cálculo.



Então, pretendemos saber:

$$\int_A v * (u^2 + v^2) dA$$

Mas podemos ter:

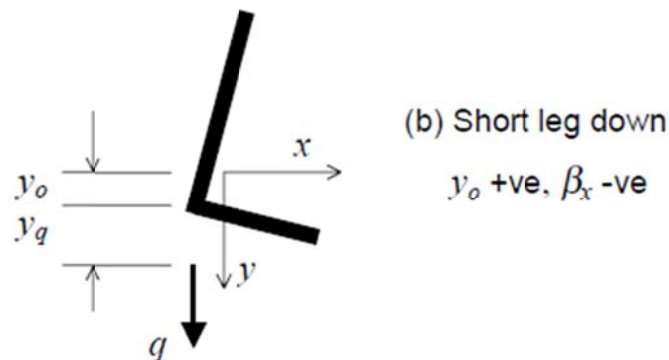
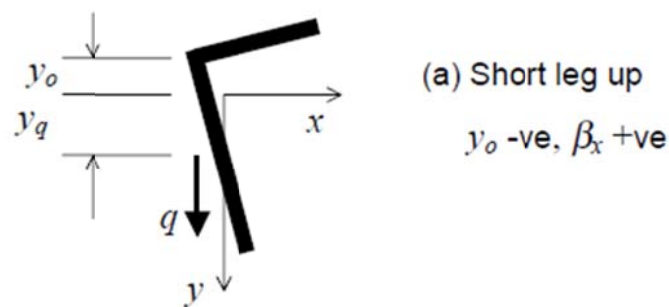
$$\int_A v^3 dA + \int_A v * u^2 dA$$

E sabemos que:

$$\int_A v^3 dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{A_k}{4} * (v_i^3 + v_{i+1}^3 + v_i^2 * v_{i+1} + v_i * v_{i+1}^2) \right)$$

$$\int_A v * u^2 dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{A_k}{4} * \left(u_i^2 * \left(v_i + \frac{v_{i+1}}{3} \right) + u_{i+1}^2 * \left(\frac{v_i}{3} + v_{i+1} \right) + \frac{2}{3} * u_i * u_{i+1} * (v_i + v_{i+1}) \right) \right)$$

Para tal adopta-se um sistema de eixos de acordo com Trahair (2002) in “Lateral Buckling Strengths of Steel Angle Section Beams” “Research Report No R812”:

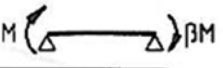

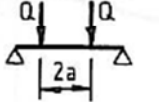
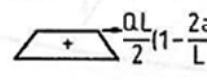
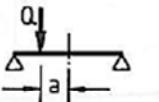
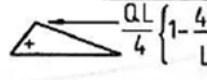
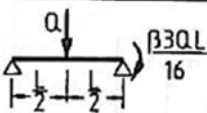
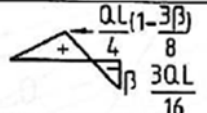
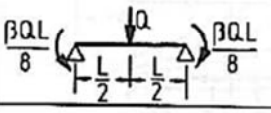
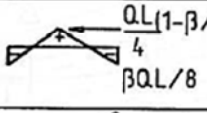
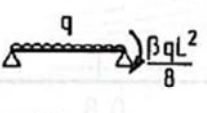
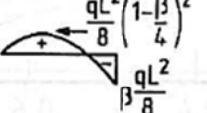
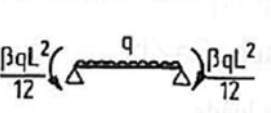
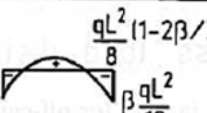


Isto indica-nos que para o cálculo de β_u o eixo de menor inércia deve estar

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

orientado no sentido da carga, pois tal orientação interfere no sinal de β_u .

Para o Cálculo de α_m Trahair (1993) refere uma tabela de valores possíveis para os diferentes diagramas:

Beam Segment	Moment Distribution	α_m	Range
		$1.75 + 1.05\beta + 0.3\beta^2 \neq 2.5$	$-1 < \beta < 1$
		$1.0 + 0.35(1.0 - 2a/L)^2$	$0 < 2a < L$
		$1.35 + 0.4(2a/L)^2$	$0 < 2a < L$
		$1.35 + 0.15\beta$ $-1.2 + 3.0\beta$	$0 < \beta < 0.89$ $0.89 < \beta < 1$
		$1.35 + 0.36\beta$	$0 < \beta < 1$
		$1.13 + 0.10\beta$ $-1.25 + 3.5\beta$	$0 < \beta < 0.7$ $0.7 < \beta < 1$
		$1.13 + 0.12\beta$ $-2.38 + 4.8\beta$	$0 < \beta < 0.75$ $0.75 < \beta < 1$

Como no nosso caso o valor de $a=0$, $\alpha_m=1,35$.

Resumo das resistências por instabilidade da secção por carga de flexão.

Secção	$M_{b,Rd}$ (kN.m)	$M_{b,fi,t,Rd}$ (kN.m)			$M_{b,fi,t,Rd,mod}$ (kN.m)		
		$\mu_0=0,3$	$\mu_0=0,3$	$\mu_0=0,5$	$\mu_0=0,3$	$\mu_0=0,5$	$\mu_0=0,7$
IPE 100	7,58	1,08	1,08	1,87	1,20	2,09	2,98
IPE 220	57,88	7,36	7,36	12,83	8,218	14,33	20,47
LNP 100x50x8 (u-u)	6,35	1,69	1,69	2,837	1,88	3,17	4,39

Valor de carga admissível.

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Na nossa situação, iremos ter um diagrama de momentos triangular, em que o momento máximo do sistema é obtido por:

$$M_{m\acute{a}x} = P * \frac{l}{4}$$

Em que P é a carga a aplicar;

l é o comprimento entre apoios.

Então, temos o valor da carga máxima a aplicar consoante o momento resistente da secção:

$$P = M_{m\acute{a}x} * \frac{4}{l}$$

Resumo da capacidade de carga resistente nas secções.

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Utilização	Temp=20°C			μo=30%			μo=50%			μo=70%			
Força	Compressão		Flexão	Compressão	Flexão		Compressão	Flexão		Compressão	Flexão		
Perfil	Nrd (plastificação)	Nb,rd (encurvadura Buckling)	Pb,rd (encurvadura Lateral)	Nb,fi,t,Rd (encurvadura Buckling)	Ffi,θ,Rd (plastificação)	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	Nb,fi,t,Rd (encurvadura Buckling)	Ffi,θ,Rd (plastificação)	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	Nb,fi,t,Rd (encurvadura Buckling)	Ffi,θ,Rd (plastificação)	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	
IPE 100 S235	242.05	138.54	25.04	25.26	9.703	3.557	44.15	15.845	6.188	63.16	21.433	8.815	(KN)
IPE 220 S235	784.2	686.51	191.35	155.96	70.27	24.314	262.25	114.746	42.407	363.15	155.217	60.553	(KN)
SHS 100*100*4,0 S235	359.55	335.82	42,65 (sem enc. Lat.)	86.64	13.517	n.d.	143.7	22.073	n.d.	196.82	29.858	n.d.	(KN)
CHS 101,6*4,05 S235	284.35	259.11	29,37 (sem enc. Lat.)	65.75	9.307	n.d.	109.36	15.198	n.d.	150.12	20.558	n.d.	(KN)
LNP 100*50*8 S275	313.5	136.99	8.342 (flexão desviada)	20.5	n.d.	1.686	80.98	n.d.	4.07	114.58	n.d.	5.560	(KN)

Valores a vermelho ultrapassam a capacidade de carga das nossas células de carga.

10t=100kN

RELATÓRIO – Resistência dos perfis a ensaiar

Pela nova proposta do Paulo Vila Real, vamos ter:

Utilização	$\mu_o=30\%$	$\mu_o=50\%$	$\mu_o=70\%$	
Força	Flexão	Flexão	Flexão	
Perfil	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	Fb,fi,t,Rd (encurvadura Lateral)	
IPE 100 S235	3.975	6.914	9.849	(KN)
IPE 220 S235	27.167	47.382	67.656	(KN)
LNP 100*50*8 S275	2.576	4.257	5.813	(KN)