

# **PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE PORTICO INDUSTRIAL METÁLICO**

Luís Pedro Almeida Quintal

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

## **SUMÁRIO**

Apresenta-se a formulação e respectiva aplicação no cálculo do pré-dimensionamento de um pórtico industrial metálico com um vão entre colunas de 30 metros e afastamento entre pórticos de 9,00 metros. O pré-dimensionamento terá por base uma análise plástica.

## **1. INTRODUÇÃO**

Pretende-se o pré-dimensionamento de um pórtico industrial em que para tal será considerada a análise plástica, tendo em vista uma solução mais vantajosa do ponto de vista económico do que a obtida considerando uma análise elástica.

A análise plástica utilizada tem por base que o crescimento proporcional das forças actuantes sobre a estrutura leva ao aparecimento de rótulas plásticas, isto é, secções que podem rodar sobre si mesmas com forças distintas das calculadas pelo método elástico. A criação destas rotulas plásticas vai permitir a redistribuição de esforços pela restante estrutura até se verificar o aparecimento de  $m+1$  rótulas plásticas, sendo  $m$  o grau de hiperstaticidade da estrutura, altura em que ocorrerá o colapso total da estrutura.

As referidas rótulas plásticas irão ocorrer na estrutura à medida que as tensões nas secções atingem a capacidade de resistência plástica das mesmas.

## **2. CARACTERÍSTICAS DO PAVILHÃO**

O pavilhão industrial metálico em estudo é caracterizado por um único vão, com espaçamento entre colunas de 30 metros e afastamento de pórticos de 9 metros.

Este terá um comprimento de 135 metros com uma inclinação de travessas de  $6^\circ$ . A sua localização será em Coimbra, estando sujeito a um peso próprio distribuído de  $0,25 \text{ KN/m}^2$ , uma sobrecarga de  $0,75 \text{ KN/m}^2$  e à acção do vento dimensionada em função das características do local e características geométricas.

A ligação da estrutura metálica ao solo será efectuada por um apoio rotulado.

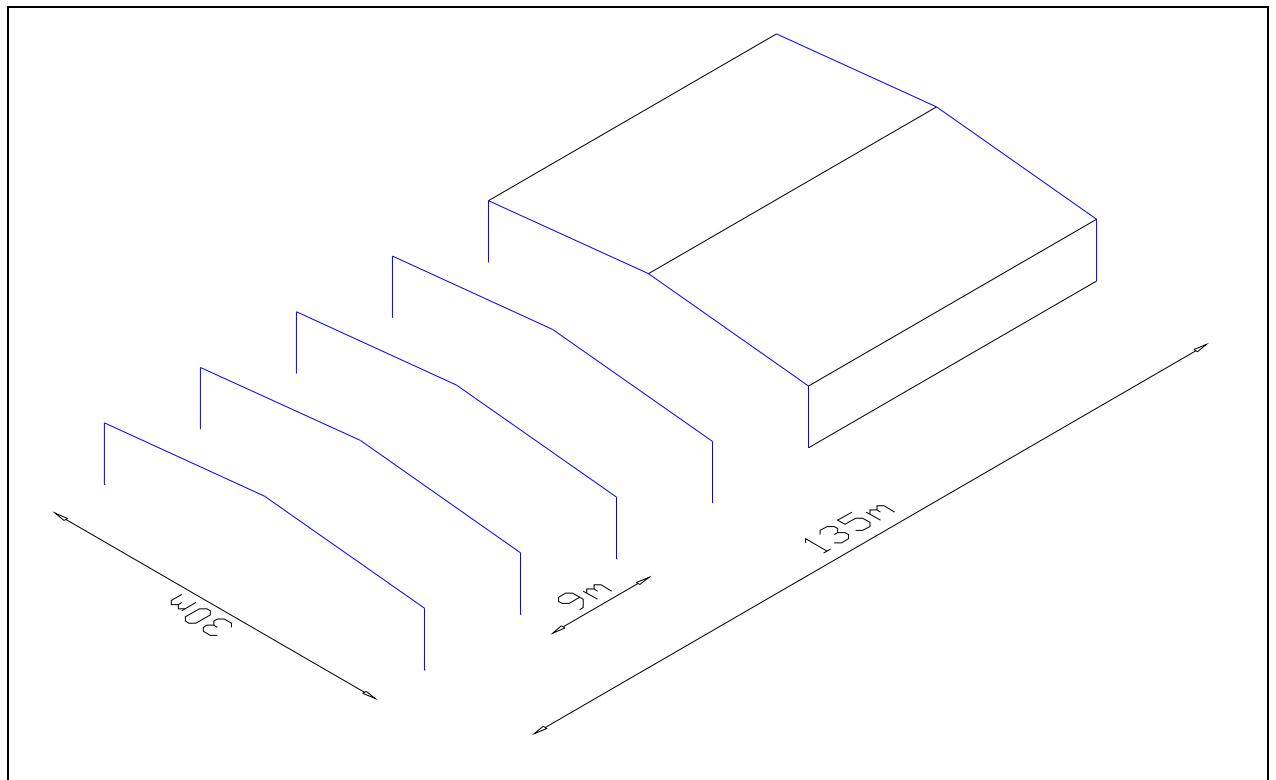


fig1- estrutura geral dos pórticos

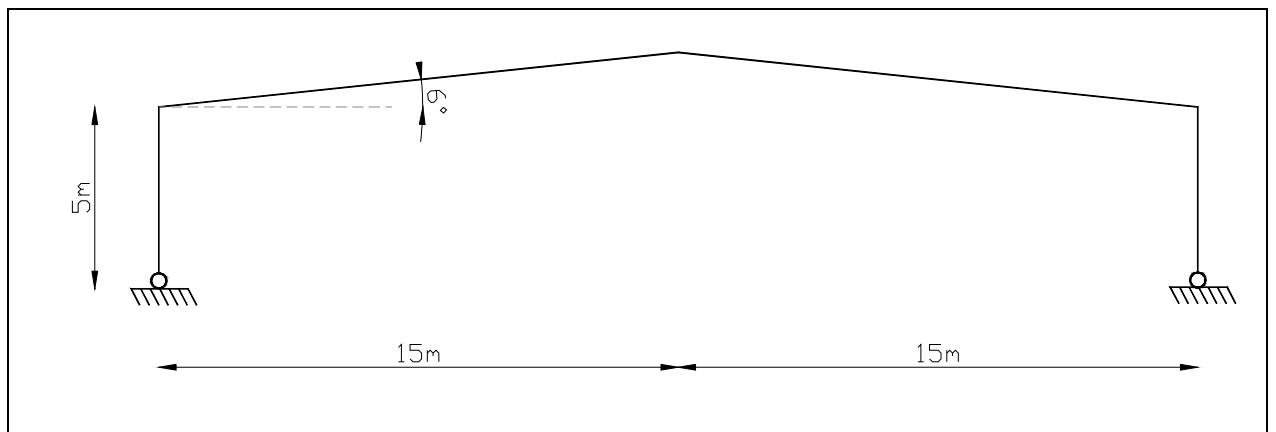


fig2 - esquema base da estrutura do pórtico

### 3. CARACTERIZAÇÃO DAS ACÇÕES

#### 3.1 PESO PRÓPRIO

O peso próprio da estrutura e por se tratar de um exercício académico será considerado uniforme e caracterizado por um valor de  $0,25 \text{ KN/m}^2$ .

Este valor não deve ser considerado como referência pois trata-se de um valor aleatório e sem base de sustentação prática, o mesmo acontecendo com a distribuição uniforme do peso próprio, pois uma parte importante do mesmo encontra-se concentrado nos perfis da estrutura principal, bem assim como a carga uniforme da cobertura é transmitida às madres que por sua vez a transmitem ao pórtico em pontos específicos e previamente localizados.

#### 3.2 SOBRECARGA

O valor da sobrecarga a aplicar na estrutura será de  $0,75 \text{ KN/m}^2$ .

#### 3.3 VENTO

O dimensionamento da acção do vento será obtido de acordo com o preconizado no RSA (Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes).

Admitindo que as quatro fachadas têm permeabilidade semelhante.

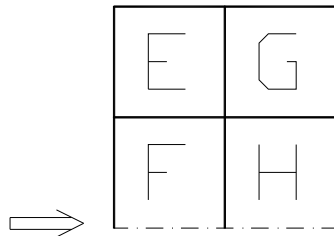
- Cálculo da pressão dinâmica do vento  $w_k$  ( $\text{KN/m}^2$ )  
     Pavilhão localizado em Zona A  
     + altura  $\leq 10\text{m}$   
     + Rugosidade aerodinâmica do vento tipo II  
      $w_k = 0,90 \text{ KN/m}^2$
- Velocidade do vento  
      $v = 25 \text{ m/s}$  (art. 1.1.1 - anexo I do RSA)
- Coeficientes de pressão  
     afectados de sinal positivo ou negativo consoante correspondem a pressões ou a sucções exercidas nas faces do elemento a que se referem.

$$\begin{aligned} &\rightarrow \delta_{pe} \\ &h/b = 5/30 = 0.16667 \\ &a/b = 135/30 = 4.50 \end{aligned}$$

cobertura

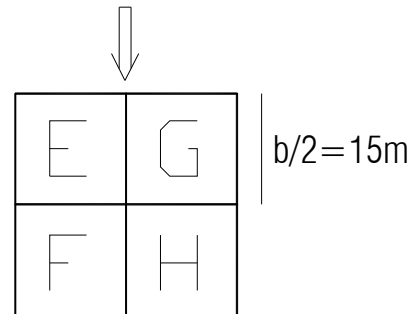
*desprezando as acções locais*

vento a  $0^\circ$



$$\begin{aligned} E, F &= -0,96 \\ G, H &= -0,40 \end{aligned}$$

vento a  $90^\circ$

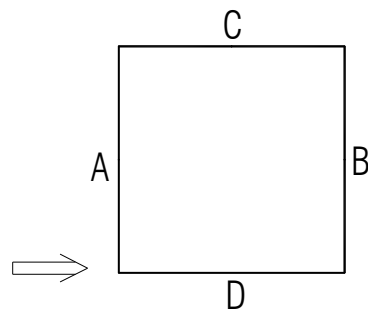


$$\begin{aligned} E, G &= -0,80 \\ F, H &= -0,44 \end{aligned}$$

paredes

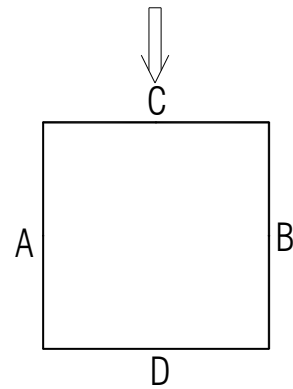
*desprezando as acções locais*

vento a  $0^\circ$



$$\begin{aligned} A &= +0,7 \\ B &= -0,25 \\ C &= -0,60 \\ D &= -0,60 \end{aligned}$$

vento a  $90^\circ$



$$\begin{aligned} A &= -0,50 \\ B &= -0,50 \\ C &= +0,70 \\ D &= -0,10 \end{aligned}$$

→  $\delta_{pi}$

Considerando que as quatro fachadas possuem permeabilidade semelhante temos:

$$\delta_{pi} = -0,30$$

#### 4. PRESSUPOSTOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

O pré-dimensionamento terá como base inerente a constituição de esquadros de reforço ao nível da ligação coluna travessa, bem assim como na cumeeira, que terão função não só de reforço estrutural como também de permitir a transmissão dos esforços verificados na estrutura às ligações que se executam nesses pontos críticos.

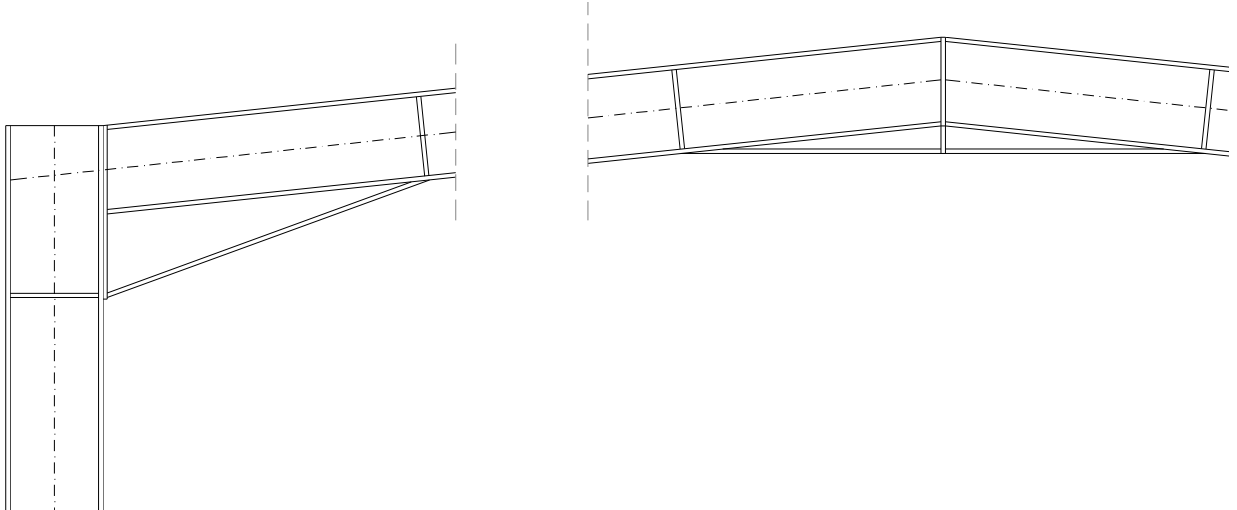
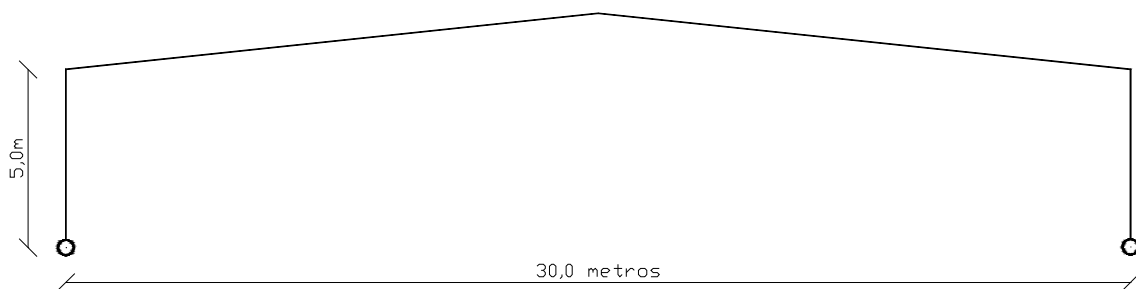


fig3 – esquadros de reforço a aplicar nas ligações coluna/travessa e cumeeira

#### 5. CÁLCULO PLÁSTICO



A estrutura representada é hiperstática de grau um,

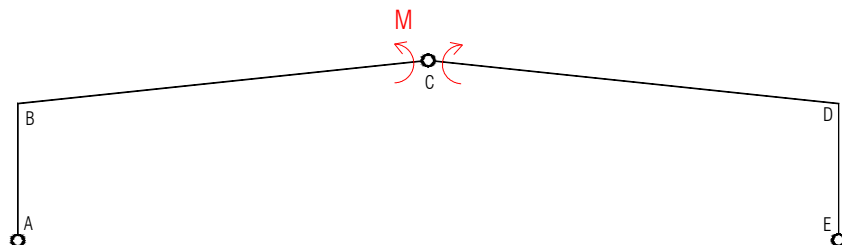
$$\alpha = l + r - 3b \quad c/ \quad l = \text{número de ligações internas}$$

$$\alpha = 9 + 4 - 3 \times 4 \quad r = \text{número de reacções de apoio}$$

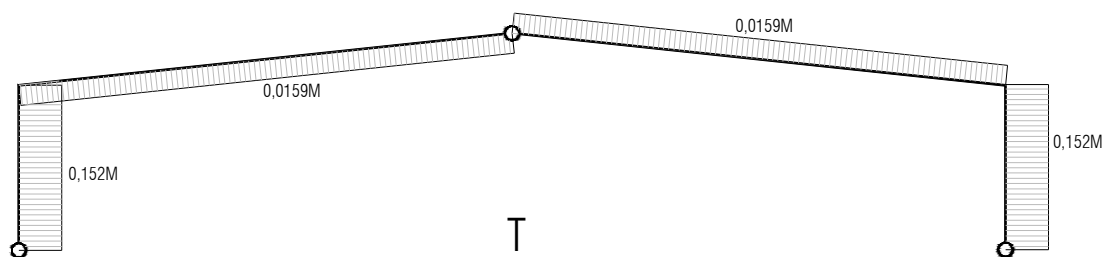
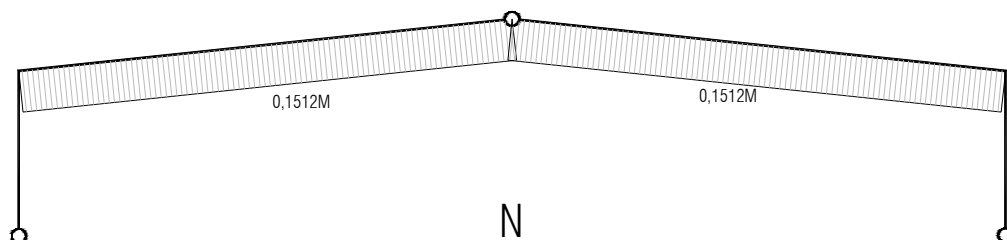
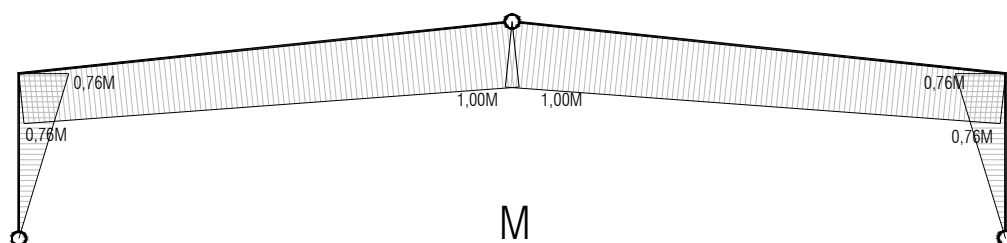
$$\alpha = 1 \quad b = \text{número de corpos}$$

e necessita portanto de duas rotulas plásticas para que ocorra a sua rotura.

Através da introdução de uma reacção hiperstaticas  $M$  em  $C$ , transformamos o sistema em um sistema isostático.



Os diagramas de esforços para a presente situação são,



## 6. COMBINAÇÕES DE ACÇÕES

As combinações de acções a considerar e de acordo com o RSA são:

### 6.1 ACÇÃO BASE SOBRECARGA

$$1,35 G1 + 1,5(Q1 + \psi_0 W1)$$

Apesar de  $\psi_0 = 0,4$  para a acção vento, e como se admite que a sobrecarga em causa seja fundamentalmente devido à concentração de pessoas (ou das sobrecargas em coberturas ordinárias), não se considera verosímil a actuação simultânea no mesmo elemento destas duas acções (art. 7.1 do RSA).

Naturalmente que se a acção sobrecarga tivesse origem noutro pressuposto e se houvesse sustentabilidade probabilística para a ocorrência simultânea da acção vento com a sobrecarga então as mesmas deveriam ser consideradas em simultâneo.

Assim, temos para a presente sobrecarga o seguinte diagrama de cargas na estrutura original hiperstatica.

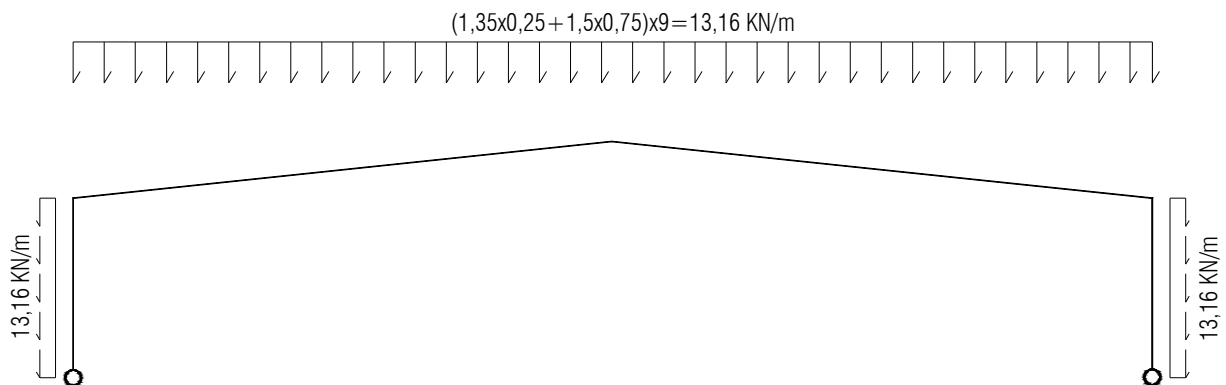


fig4 - carregamento aplicado combinação acção base sobrecarga

Esta estrutura apresenta um eixo de simetria geométrico coincidente com o eixo de simetria da aplicação das cargas.

Conforme referido atrás o cálculo plástico pressupõe a criação de  $m+1$  rótulas plásticas, sendo  $m$  o grau de hiperstaticidade da estrutura.

Desta forma e analisando a estrutura é evidente que as duas primeiras rotulas plásticas irão formar-se nas ligações coluna / travessa nos pontos B e D

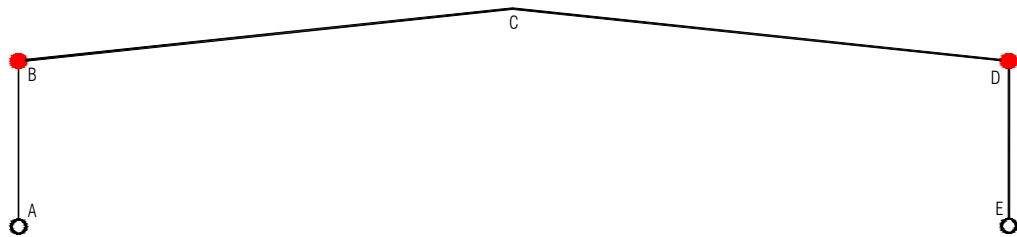


fig.5 - formação de rotula plásticas

Estas duas rotulas plásticas e para o carregamento aplicado iram-se formar simultaneamente, sendo que e embora estejam formadas  $m+1$  rotulas plásticas, critério necessário para o colapso da estrutura, a verdade é que para este carregamento e embora a estrutura já seja hipostática a mesma não sofrerá colapso, porquanto verifica-se um equilíbrio vertical que não é quebrado pelas rotulas plásticas formadas. Isto implicaria a formação de uma terceira rotula plástica no ponto C, onde apartir da qual se verificaria o colapso da estrutura.

O raciocínio atrás referido é apenas válido num plano teórico, na prática e devido a imperfeições de geometria ou a não linearidade da aplicação das cargas verifica-se o colapso da estrutura com a formação das duas rotulas atrás referidas, sendo que estas formam-se praticamente em simultaneamente pelo que não se verificará qualquer tipo de redistribuição de esforços antes do colapso.

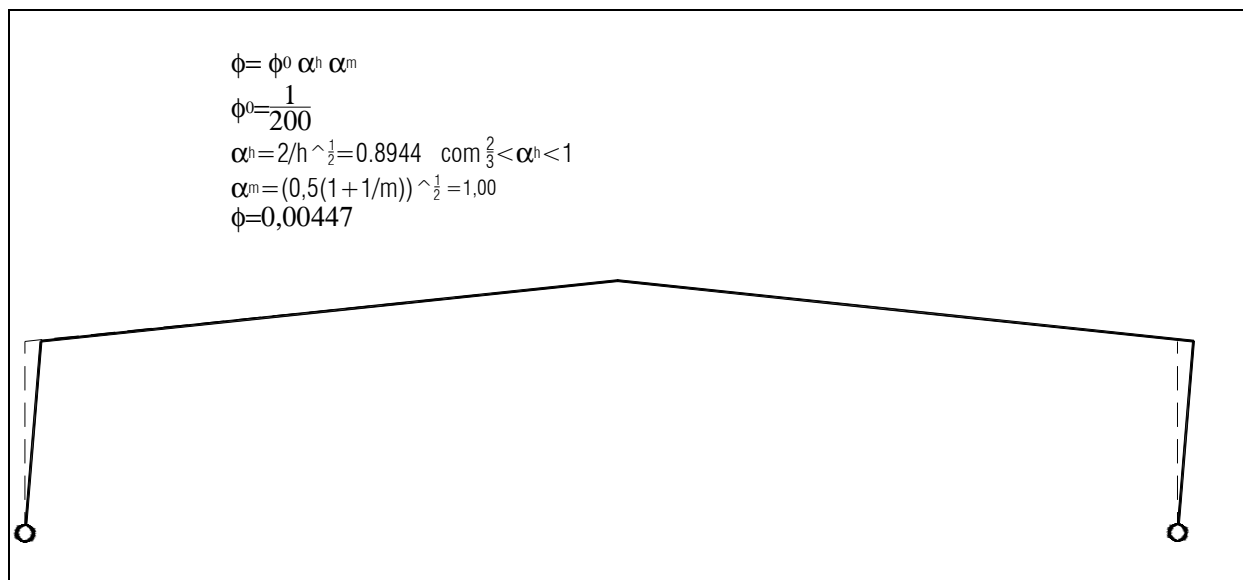
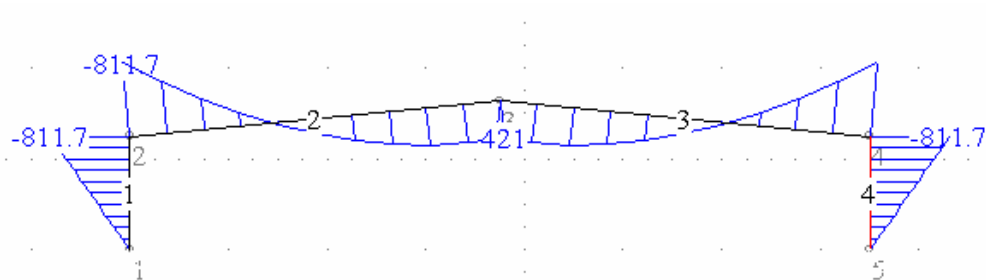
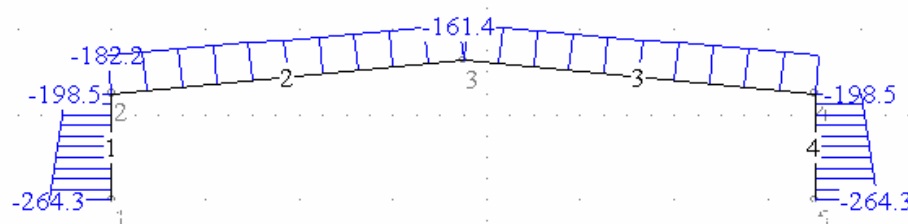
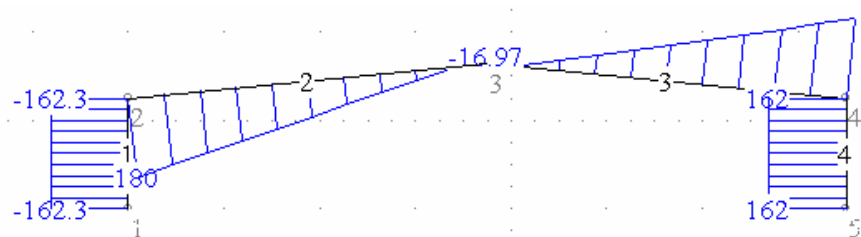


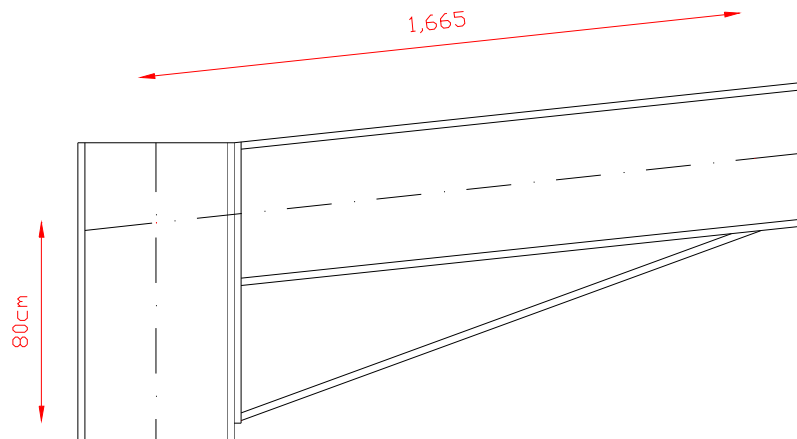
fig6 - imperfeições geométricas

assim, temos para o carregamento conforme a figura 4 os seguintes diagramas de esforços,



diagrama de momentosdiagrama de esforço axialdiagrama de esforço transversal

obtidos os diagramas de esforços procederemos ao pré-dimensionamento das colunas, travessas e esquadros de reforço. Admitindo a seguinte configuração para o esquadro de reforço na ligação coluna/travessa



teremos o seguinte momento máximo na coluna na zona de transmissão de esforços do esquadro de reforço

$$M_{Ed} = -681,83 \text{ KN.m}$$

$$\text{Pelo que } w_{pl} \geq \frac{M_{Ed} \gamma_{mo}}{f_y} \Leftrightarrow w_{pl} \geq \frac{681,86 \times 1,0}{275 \times 10^3} \Leftrightarrow w_{pl} \geq 2479,49 \text{ cm}^3,$$

O que usando um perfil do tipo IPE teremos um IPE550

Relativamente à travessa e para o momento localizado na zona de interligação entre o esquadro de reforço e a travessa localizado a 1,665 metros do ponto de intercepção do eixo da coluna e da travessa teremos o seguinte momento máximo

$$M_{Ed} = -527,95 \text{ KN.m}$$

$$\text{Pelo que } w_{pl} \geq \frac{M_{Ed} \gamma_{mo}}{f_y} \Leftrightarrow w_{pl} \geq \frac{527,94 \times 1,0}{275 \times 10^3} \Leftrightarrow w_{pl} \geq 1919,78 \text{ cm}^3,$$

O que usando um perfil do tipo IPE teremos um IPE500.

## 6.2 ACÇÃO BASE VENTO A 0°.

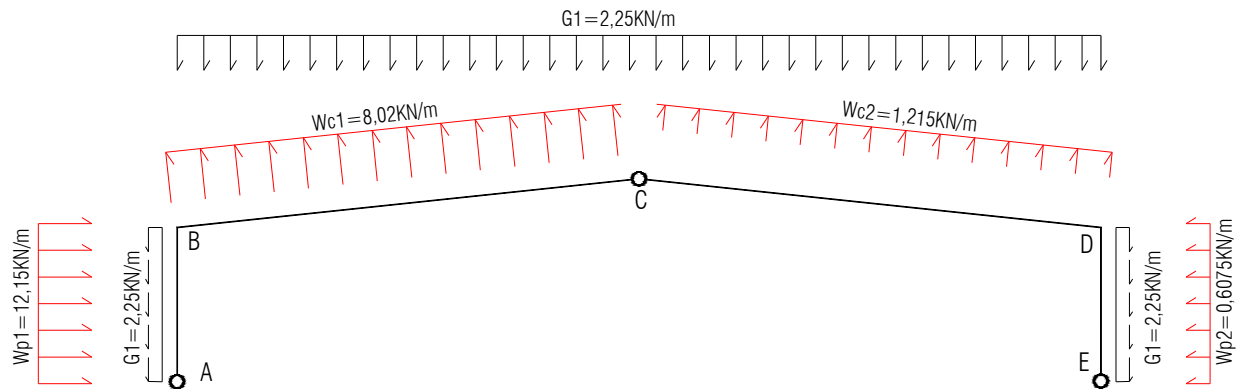
Como o peso próprio toma um caracter favorável à estabilidade da estrutura, teremos a combinação,

$$1,00 \text{ G} + 1,5 (\text{W}_1 + \psi_0 \text{ Q}_1)$$

$\psi_0 = 0$  - valor reduzido da sobrecarga nas coberturas é nulo.

Neste caso e como é de prever que se formem duas rotulas plásticas em situações distintas, sendo que o aparecimento das mesmas levará à rotura total da estrutura, não se verificando em termos teóricos qualquer tipo de equilíbrio instável, como aconteceu na combinação anterior, iremos proceder a um calculo plástico da estrutura com a

determinação do respectivo momento plástico que ocorrerá nas rotulas. Para tal vamos considerar a estrutura isostática considerada atrás com as cargas aplicadas,



$$G1 = \gamma \cdot p_p \cdot L_t = 1,0 \times 0,25 \times 9 = 2,25 \text{ kN/m}$$

$$W_{p1} = \gamma \cdot (\delta_{pe} + \delta_{pi}) \cdot w_k \cdot L_t = 1,5 \times (0,7 + 0,3) \times 0,90 \times 9 = 12,15 \text{ kN/m}$$

$$W_{p2} = \gamma \cdot (\delta_{pe} + \delta_{pi}) \cdot w_k \cdot L_t = 1,5 \times (0,25 - 0,3) \times 0,90 \times 9 = -0,6075 \text{ kN/m}$$

$$W_{c1} = \gamma \cdot (\delta_{pe} + \delta_{pi}) \cdot w_k \cdot L_t = 1,5 \times (0,96 - 0,3) \times 0,90 \times 9 = 8,02 \text{ kN/m}$$

$$W_{c2} = \gamma \cdot (\delta_{pe} + \delta_{pi}) \cdot w_k \cdot L_t = 1,5 \times (0,4 - 0,3) \times 0,90 \times 9 = 1,215 \text{ kN/m}$$

da qual resultam os seguintes diagramas de esforços

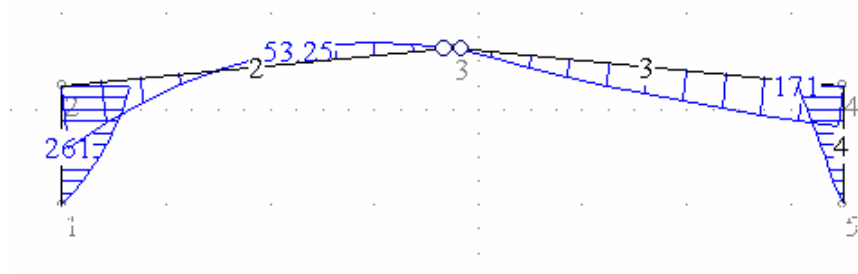


diagrama de momentos

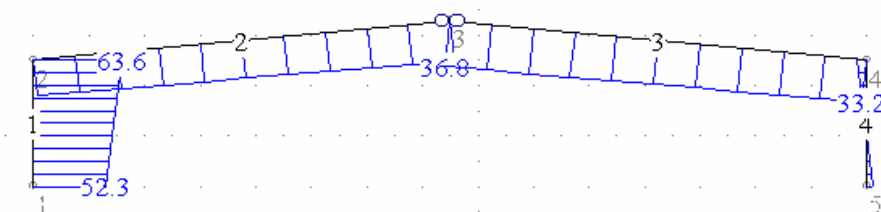


diagrama de esforço axial

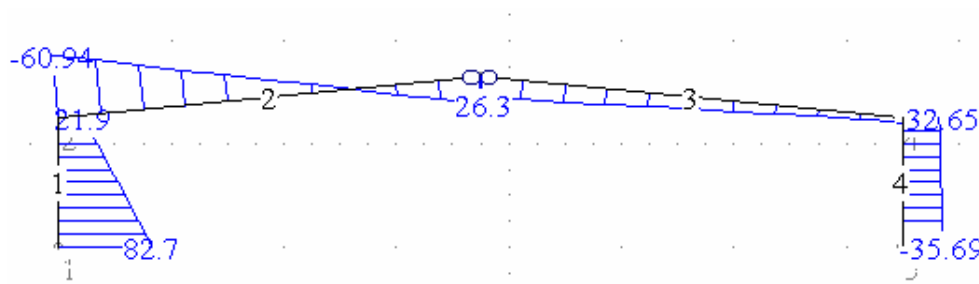
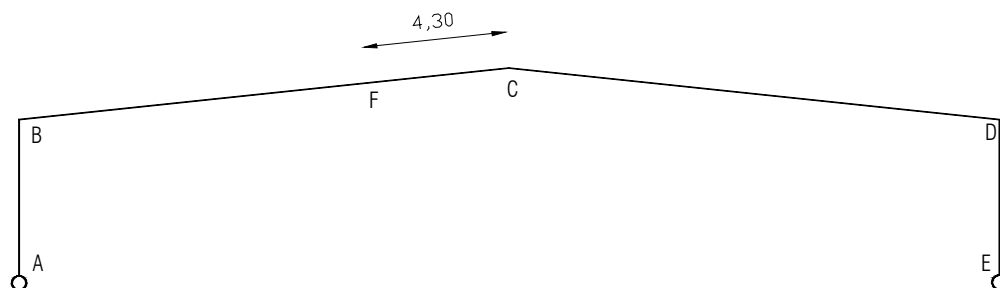


diagrama de esforço transversor

Adicionando os momentos obtidos com os da estrutura isostática inicial sujeita à reacção hiperstática  $M$  em  $C$ , deduzimos os momentos flectores para cada uma das secções potencialmente críticas.



não considerando esquadros de reforços, e adoptando que as rotulas plásticas se formariam em  $B$  e  $C$ , teríamos,

$$\begin{aligned} \text{Ponto B: } 0,76M + 261,48 &= M_{p,\text{coluna}} \\ \text{Ponto C: } M &= -M_{p,\text{travessa}} \\ \text{Ponto D: } 0,76M + 171,00 &< M_{p,\text{coluna}} \\ \text{Ponto F: } 0,932M - 59,50 &< -M_{p,\text{travessa}} \\ M_{p,\text{coluna}} &= 1,3 \times M_{p,\text{travessa}} \quad (\text{estimado}) \end{aligned}$$

Resolvendo as duas primeiras equações e a ultima teríamos que  
 $M = -126,93 \text{ KN.m}$

$$M_{p,\text{coluna}} = 165,012 \text{ KN.m}$$

$$M_{p,\text{travessa}} = 126,93 \text{ KN.m}$$

Verificando para o ponto  $D$  e  $F$ , temos,

$$\text{Ponto D: } 0,76 \times (-126,93) + 171 = 74,53 < M_{p,\text{coluna}} \quad \lll \text{verifica} \ggg$$

$$\text{Ponto F: } 0,932 \times (-126,93 - 59,50) = -177,80 > -M_{p,\text{travessa}} \quad \lll \text{não verifica} \ggg$$

Desta forma vamos considerar como possível a formação das rotulas plásticas em  $B$  e  $F$ , pelo que teríamos,

$$\text{Ponto B: } 0,76M + 261,48 = M_{p,\text{coluna}}$$

$$\text{Ponto C: } M < -M_{p,\text{travessa}}$$

$$\text{Ponto D: } 0,76M + 171,00 < M_{p,\text{coluna}}$$

Ponto F:  $0,932M - 59,50 = -M_{p, travessa}$   
 $M_{p, coluna} = 1,3 \times M_{p, travessa}$

Resolvendo as duas primeiras equações e a ultima teríamos que  
 $M = -93,39 \text{ KN.m}$   
 $M_{p, coluna} = 190,50 \text{ KN.m}$   
 $M_{p, travessa} = 146,54 \text{ KN.m}$

Verificando para o ponto D e C, temos,

Ponto D:  $0,76 \times (-93,39) + 171 = 100,03 < M_{p, coluna}$  <<<verifica>>>

Ponto C:  $-93,39 < M_{p, travessa}$  <<<verifica>>>

Podemos concluir que para esta combinação de acções teríamos a formação de duas rotulas plásticas com os respectivos momentos plásticos

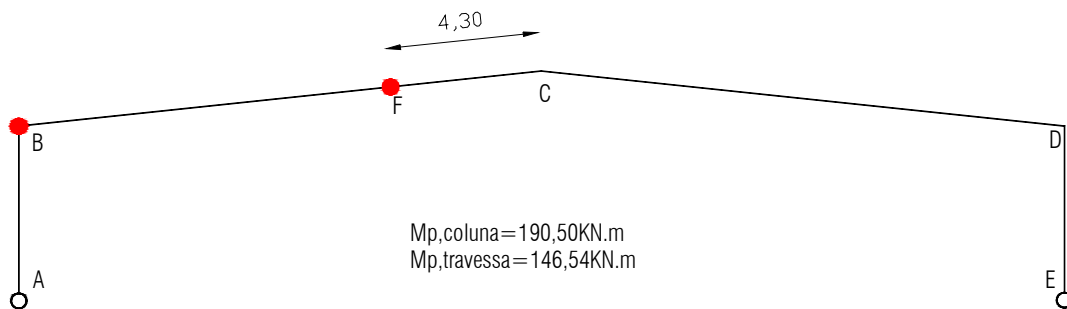


fig 7 - formação de rotulas plásticas

Estes momentos, ainda que não considerando os esquadros de reforços representam um modulo de flexão plástico bastante mais baixo do que a combinação anterior, claramente mais condicionante, no entanto e por puro exercício académico as secções que verificariam os momentos plásticos dados seriam

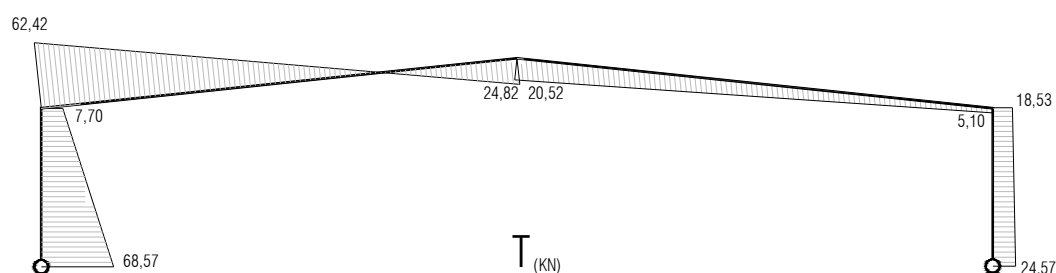
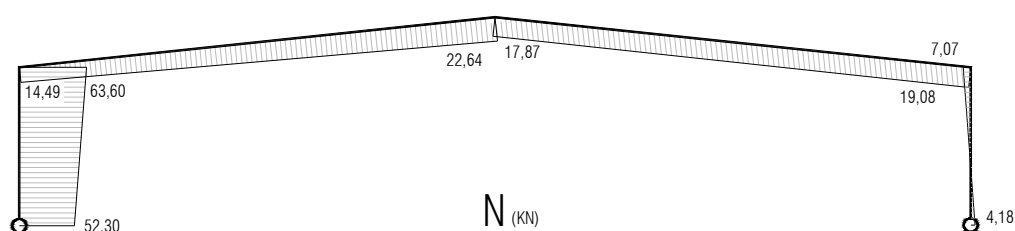
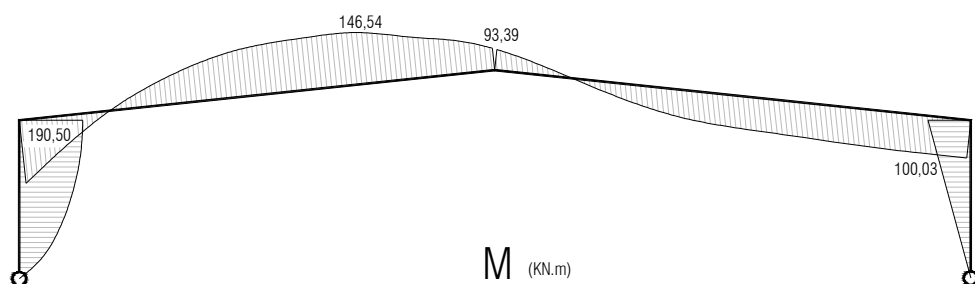
Pelo que  $w_{pl,coluna} \geq \frac{M_{Ed} \gamma_{mo}}{f_y} \Leftrightarrow w_{pl,coluna} \geq \frac{190,50 \times 1,0}{275 \times 10^3} \Leftrightarrow w_{pl,coluna} \geq 691,09 \text{ cm}^3$ ,

O que usando um perfil do tipo IPE daria um IPE330, para a travessa e do mesmo modo,

$w_{pl,travessa} \geq \frac{M_{Ed} \gamma_{mo}}{f_y} \Leftrightarrow w_{pl,travessa} \geq \frac{146,54 \times 1,0}{275 \times 10^3} \Leftrightarrow w_{pl,travessa} \geq 532,87 \text{ cm}^3$

O que usando um perfil do tipo IPE daria um IPE300.

O diagrama de esforços efectivo na estrutura em função da formação das duas rotulas seria:



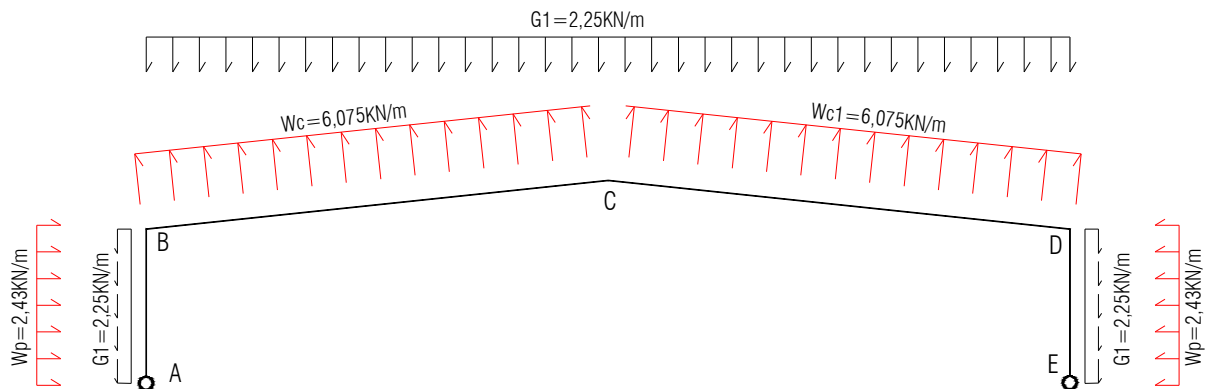
### 6.3 ACÇÃO BASE VENTO A 90°.

Como o peso próprio toma um carácter favorável à estabilidade da estrutura, teremos a combinação,

$$1,00 G + 1,5(W_1 + \psi_0 Q_1)$$

$\psi_0=0$  - valor reduzido da sobrecarga nas coberturas é nulo.

O carregamento para esta combinação de acção e considerando a estrutura isostática apresenta-se também ele simétrico e coincidente o eixo de simetria geométrico da estrutura.



$$G1 = \gamma_{pp} \cdot Lt = 1,0 \times 0,25 \times 9 = 2,25 \text{ kN/m}$$

$$Wp = \gamma_{pe} + \gamma_{pi} \cdot w_k \cdot Lt = 1,5 \times (0,5 - 0,3) \times 0,90 \times 9 = 2,43 \text{ kN/m}$$

$$Wc = \gamma_{pe} + \gamma_{pi} \cdot w_k \cdot Lt = 1,5 \times (0,8 - 0,3) \times 0,90 \times 9 = 6,075 \text{ kN/m}$$

As duas rotulas plásticas irão formar-se à semelhança do que foi descrito para a acção base sobrecarga simultaneamente na ligação coluna / travessa, o que equivale a dizer que temos uma situação de mecanismo idêntica à então descrita, com as considerações do aparecimento de uma terceira rotula plástica impedida pelas imperfeições geométricas, não linearidade, efeitos de segunda ordem, etc...

Assim, também nesta, o pré-dimensionamento será efectuada com recurso a estrutura hiperestática, e na figura anterior descritizada.

Temos desta forma os seguintes diagramas de esforços para o carregamento em causa,

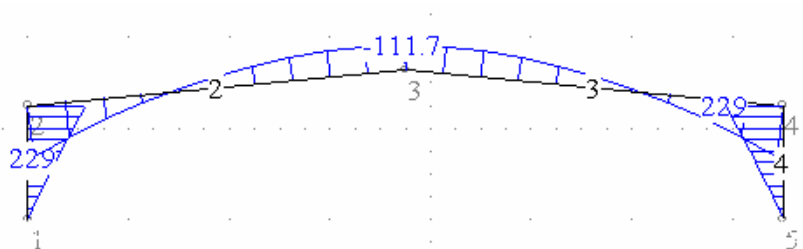


diagrama de momentos

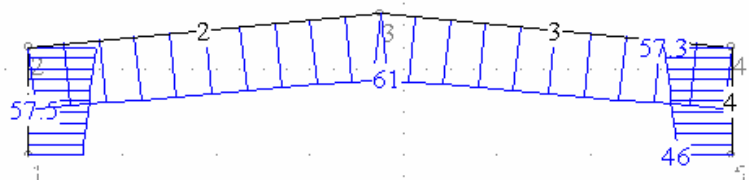


diagrama de esforço axial

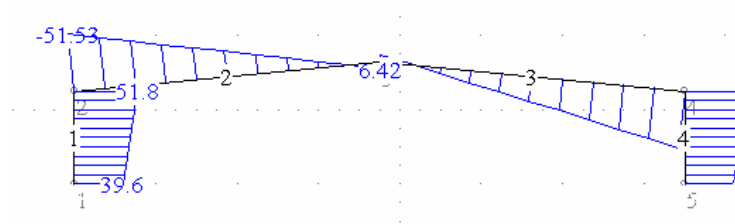


diagrama de esforço transverso

Analisando os esforços obtidos verifica-se que os mesmos são em larga medida inferiores aos verificados para a combinação de acção base sobrecarga, pelo que será essa a condicionante.

## 7. Contribuição do esforço axial para o pré-dimensionamento

Por forma a ter em conta a contribuição do esforço axial no cálculo da secção a usar, teremos de verificar a relação abaixo

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{c,RD}} \right)^{\alpha} + \left( \frac{M_{Ed}}{M_{pl,RD}} \right)^{\beta} \leq 1$$

Como a combinação de acção mais desfavorável é a acção base sobrecarga, e pelo cálculo anterior para o pré-dimensionamento da coluna tínhamos:

Perfil: IPE550

$M_{Ed} = -681,83 \text{ KN.m}$

$N_{Ed} = -209,03 \text{ KN}$

$$M_{pl,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl}}{\gamma_{M0}} = 766,425 \text{ KN.m}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}} = 3696 \text{ KN}$$

Como se trata de uma secção em I temos  $\alpha=2$ , e  $\beta=5n=1$ , pelo que

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{c,RD}} \right)^2 + \left( \frac{M_{Ed}}{M_{pl,RD}} \right)^1 \leq 1 \Leftrightarrow \left( \frac{209,03}{3696} \right)^2 + \left( \frac{681,83}{766,43} \right) = 0,8928 \leq 1 \quad <<<<\text{verifica}>>>>$$

para a travessa, temos,

Perfil: IPE500

$M_{Ed} = -527,94 \text{ KN.m}$

$N_{Ed} = -179,90 \text{ KN}$

$$M_{pl,Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl}}{\gamma_{M0}} = 603,35 \text{ KN.m}$$



$$N_{C,rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}} = 3176,25 \text{ KN}$$

Como se trata de uma secção em I temos  $\alpha=2$ , e  $\beta=5n=1$ , pelo que

$$\left( \frac{N_{Ed}}{N_{c,RD}} \right)^2 + \left( \frac{M_{Ed}}{M_{pl,RD}} \right)^1 \leq 1 \Leftrightarrow \left( \frac{179,90}{3176,25} \right)^2 + \left( \frac{527,94}{603,35} \right) = 0,878 \leq 1 \quad <<<<\text{verifica}>>>>$$

## 8. Classificação da secção

De forma a não inviabilizar o cumprimento do estipulado na secção 5.6 da parte 1.1. do EC3, no que concerne as características das secções transversais para se proceder a uma análise global plástica vai se verificar se as referidas secções se encontram na classe 1, possibilitando a eventual formação de rótulas plásticas.

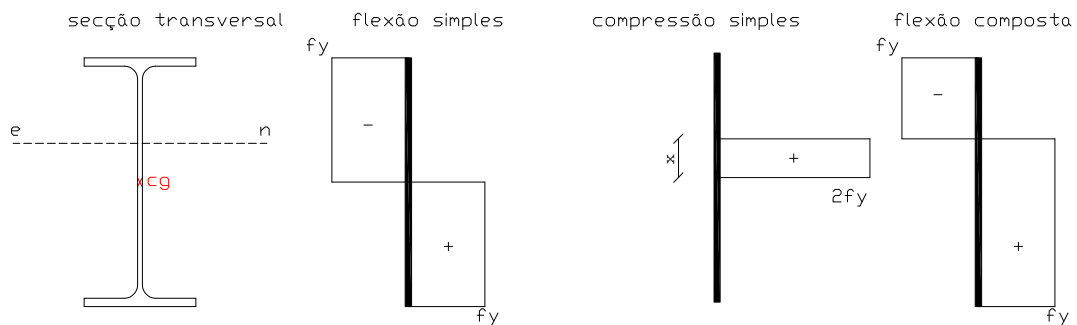


fig8 - diagramas de tensões, localização eixo neutro

### travessa

secção IPE500

$N_{Ed}=179,9 \text{ KN}$

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{179,90}{2 \times 275 \times 10^3 \times 10,2 \times 10^{-3}} = 0,03207m$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r + x}{c} = \frac{500/2 - 16 - 21 + 32,07}{426} = 0,575$$

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

$$\frac{c}{t_w} = \frac{426}{10,2} = 41,76 \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,575 - 1} = 56,27 \quad <<<\text{classe 1}>>>$$

banzo:

table 5.2

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

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 200/2 - 10,2/2 - 21 = 73,9$$

$$c/t_f = 73,9/16 = 4,62$$

<<<classe 1>>>

coluna

secção IPE550

$$N_{Ed} = 209,03 \text{ KN}$$

$$x = \frac{N_{Ed}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} = \frac{209,03}{2 \times 275 \times 10^3 \times 11,1 \times 10^{-3}} = 0,03424 \text{ m}$$

alma:

table 5.2

$$\alpha = \frac{h/2 - t_f - r - x}{c} = \frac{550/2 - 17,2 - 24 + 34,24}{467,6} = 0,573$$

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

$$c/t_w = 467,6/11,1 = 42,13 \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \times 0,92}{13 \times 0,573 - 1} = 56,49$$

<<<classe 1>>>

banzo:

table 5.2

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

$$c = b/2 - t_w/2 - r = 210/2 - 11,1/2 - 24 = 75,45$$

$$c/t_f = 75,45/17,2 = 4,38$$

<<<classe 1>>>

## 8. CONCLUSÃO

A redistribuição de esforços devido à formulação de rotulas plásticas é evidentemente mais notável em estruturas com grau de hiperstaticidade elevado, sendo que em qualquer caso o calculo plástico retira benefícios de economia considerável.

Para o presente caso em estudo e depois de todas as considerações apresentadas temos como pré-dimensionamento

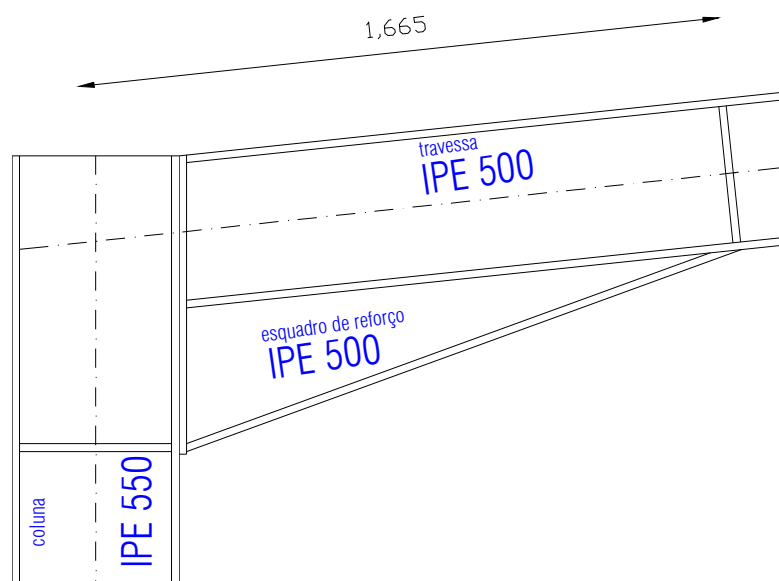


fig 8 - ligação coluna / travessa com esquadro de reforço

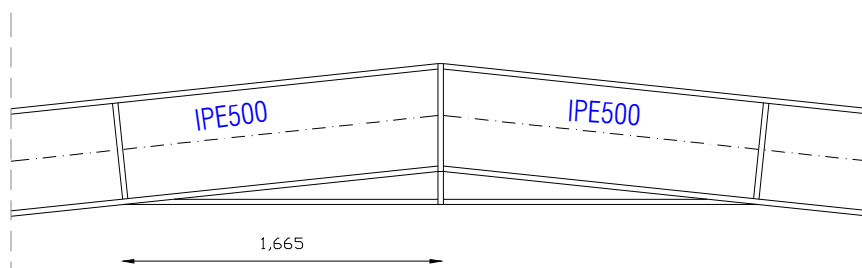


fig9 - reforço na cumeeira

Coimbra, Setembro de 2005