

SEGURANÇA ESTRUTURAL E ACÇÕES

ACÇÕES DO VENTO

ref. [Eurocódigo 1](#) – Acções em estruturas. [Parte 1-4](#) – Acções do vento

Aplicável a edifícios e pontes correntes.

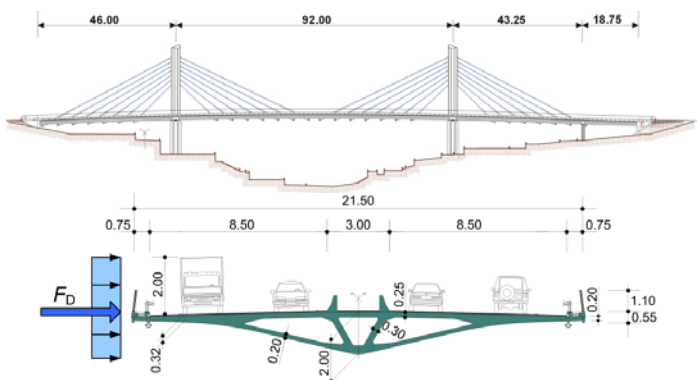
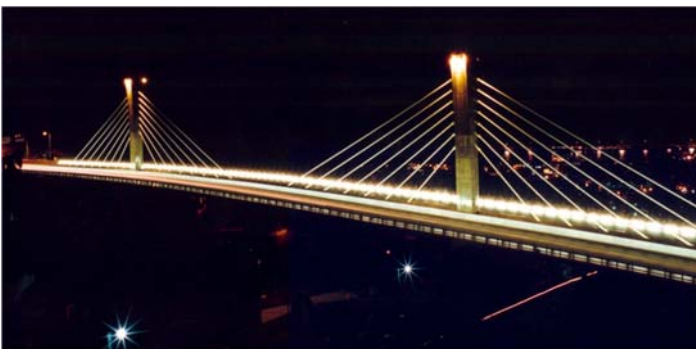
Não é aplicável diretamente a:

- construções com altura superior a 200 m;
- mastros espiados, torres em treliça e postes de iluminação;
- pontes suspensas, de tirantes ou pontes com tramo(s) de vão superior a 200 m;
- vibrações de torção ou situações em que seja necessário considerar outros modos de vibração para além do modo fundamental.



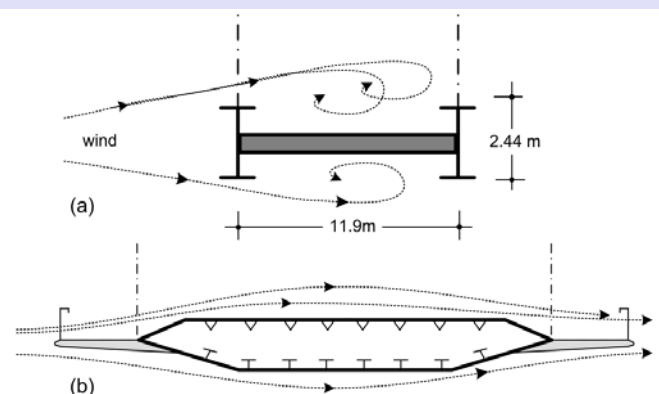
Tacoma Narrows Bridge, EUA (opened 1-7-1940; collapsed 7-11-1940)

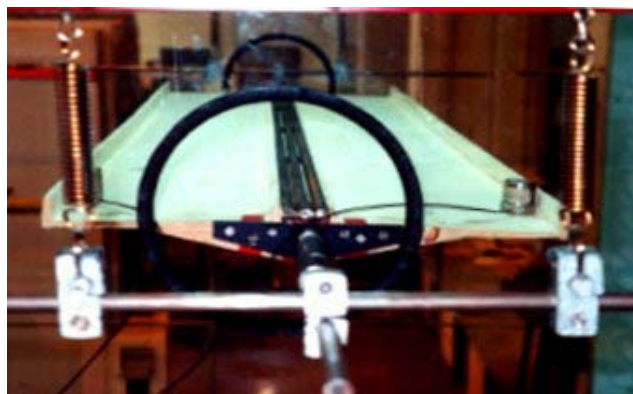
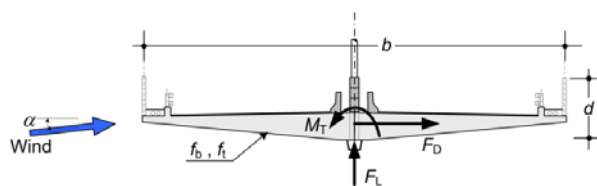
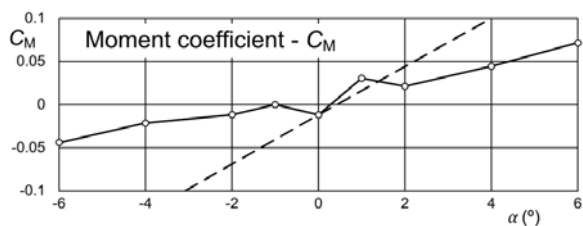
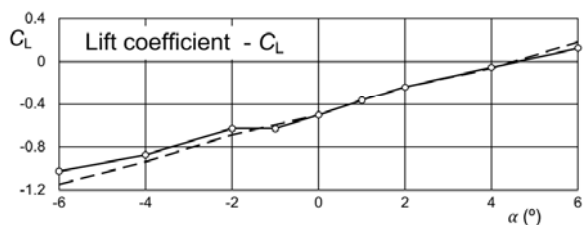
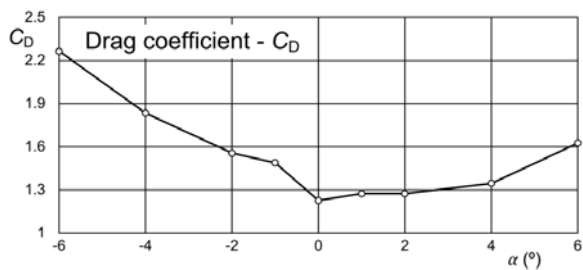
Aula T12 2/21



- Qual o comportamento da estrutura durante a acção do vento? Qual a velocidade crítica?
- Existe interacção entre modos de vibração que conduza a fenómenos de ressonância?

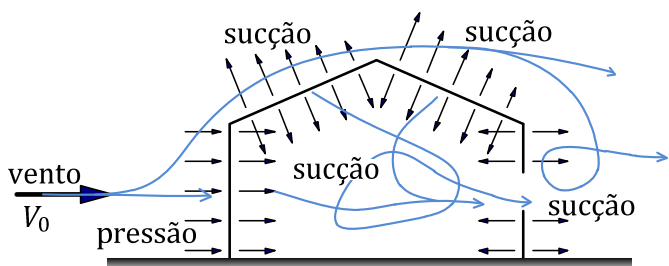
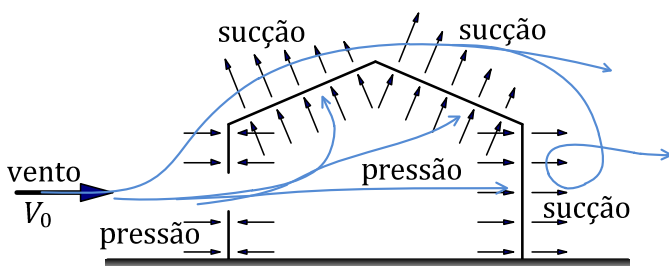
Ensaio em túnel de vento permitem detectar estes fenómenos





ACÇÕES DO VENTO

ref. Eurocódigo 1 – Acções em estruturas. Parte 1-4 – Acções do vento



Por aplicação do teorema de Bernoulli, se a energia cinética do escoamento associada à velocidade V_0 é integralmente convertida em energia de pressão (zona de estagnação do escoamento), tem-se:

$$\frac{V_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} = \frac{V_0^2}{2} + \frac{p_A}{\rho} \quad \therefore \quad \Delta p = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 = q_0$$

em que

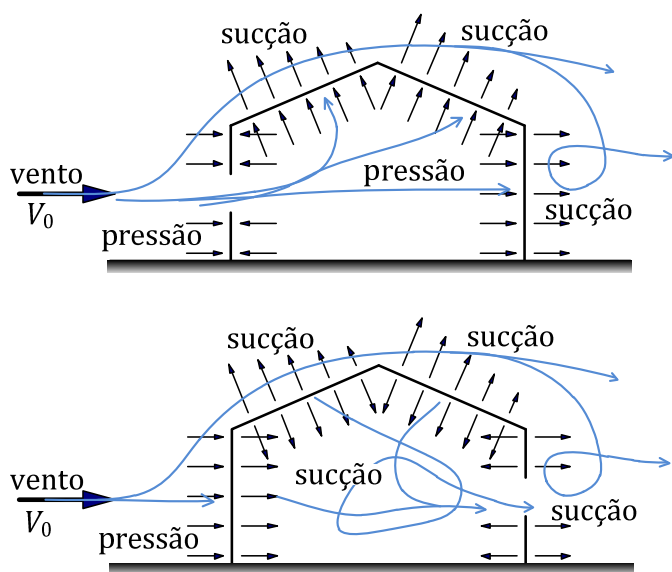
ρ a massa volúmica do ar (admite-se que o ar se comporta como um fluido homogéneo e incompressível, $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)

V_0 a velocidade do vento admitindo um escoamento unidireccional

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 = 0.625 V_0^2 \text{ pressão dinâmica}$$

ACÇÕES DO VENTO

ref. Eurocódigo 1 – Acções em estruturas. Parte 1-4 – Acções do vento



A velocidade do vento é dada pela soma da velocidade média V_m com flutuações de velocidade, ao longo do tempo, $v(t)$, i.e.

$$V_0(t) = V_m + v(t)$$

A velocidade média é obtida a partir da velocidade base V_b por

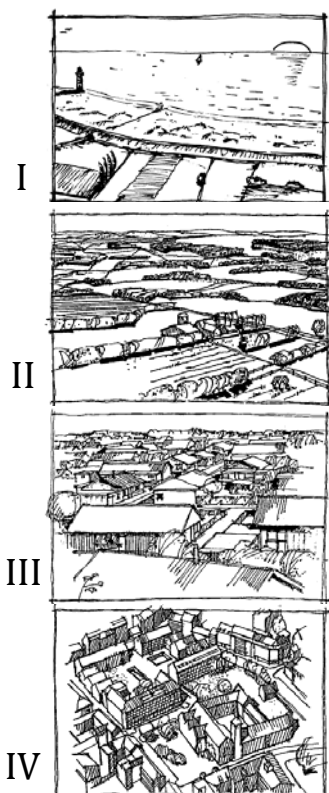
$$V_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot V_b$$

Em que

$c_o(z)$ – coeficiente de orografia, igual a 1,0 a não ser que, devido à orografia local (colinas ou falésias, por exemplo)

$c_r(z)$ – coeficiente de rugosidade, obtido para $z_{min} \leq z \leq 200$ m por:

$$c_r(z) = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \text{se } z \geq z_{min}$$



Categorias de terreno para a determinação da acção do vento

	Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 x altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 x altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15

O valor da velocidade base do vento, V_b , é dado por,

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0}$$

em que:

$V_{b,0}$ – valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos, independentemente da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do solo em terreno do tipo campo aberto – da categoria II)

c_{dir} – coeficiente de direcção ($\geq 0,85$; em geral, é tomado igual a 1,0);

c_{season} – coeficiente de sazão ($\geq 0,90$; em geral, é tomado igual a 1,0).

Em Portugal, $V_{b,0}$ é obtido em função das duas zonas seguintes:

- Zona A – a generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B,

$$V_{b,0} = 27 \text{ m/s}$$

- Zona B – regiões do continente situadas na faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m + Açores e da Madeira.

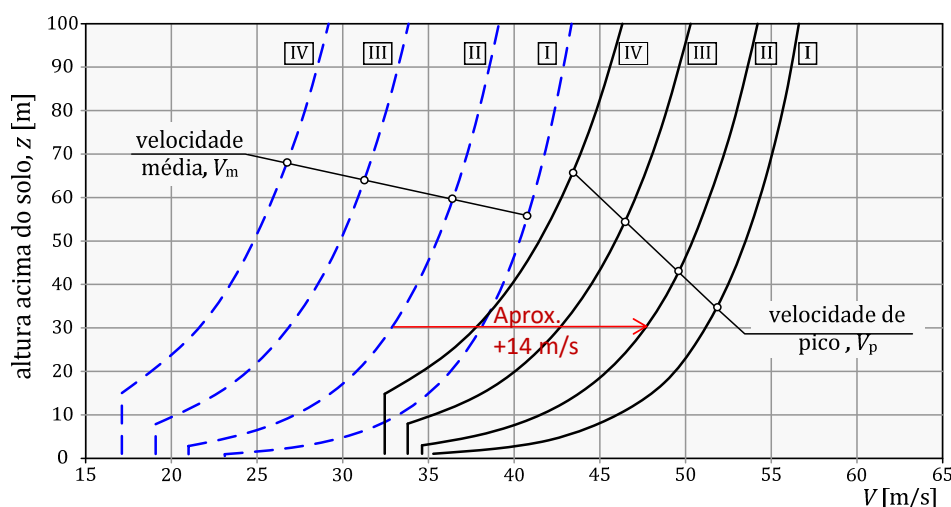
$$V_{b,0} = 30 \text{ m/s}$$

A velocidade dinâmica de pico à altura z acima do solo, $v_p(z)$, é definida em função da velocidade média $V_m(z)$ e da intensidade de turbulência $I_v(z)$ por:

$$v_p(z) = [1 + 7 I_v(z)]^{0,5} \cdot V_m(z)$$

Em que a turbulência $I_v(z)$ é dada por:

$$I_v(z) = \frac{1,0}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$



Perfis das velocidades média e de pico para a zona A ($V_b = 27 \text{ m/s}$, $c_o = 1,0$)

A pressão dinâmica de pico à altura z acima do solo, $q_p(z)$, pode ser definida a partir da velocidade média $V_m(z)$, da intensidade de turbulência $I_v(z)$ e da massa volúmica do ar (ρ) através de:

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V_m^2(z)$$

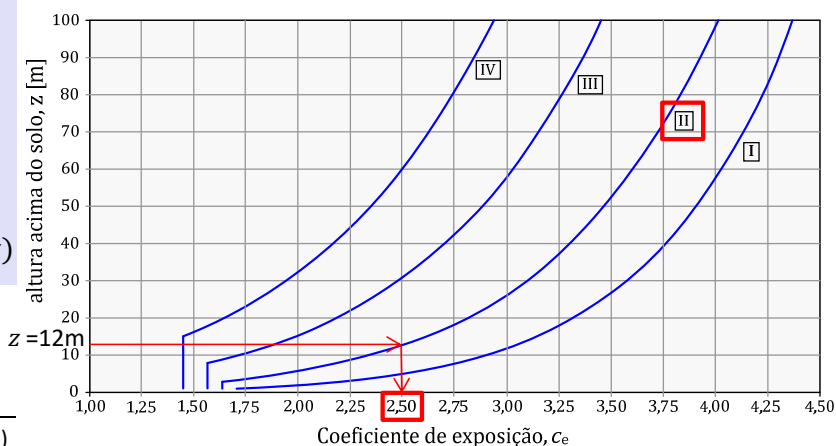
$$= \left[1 + \frac{7}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot [c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot V_b]^2$$

Ou simplesmente,

$$q_p(z) = c_e(z) 0,625 V_b^2$$

em que o coeficiente de exposição $c_e(z)$, é dado por:

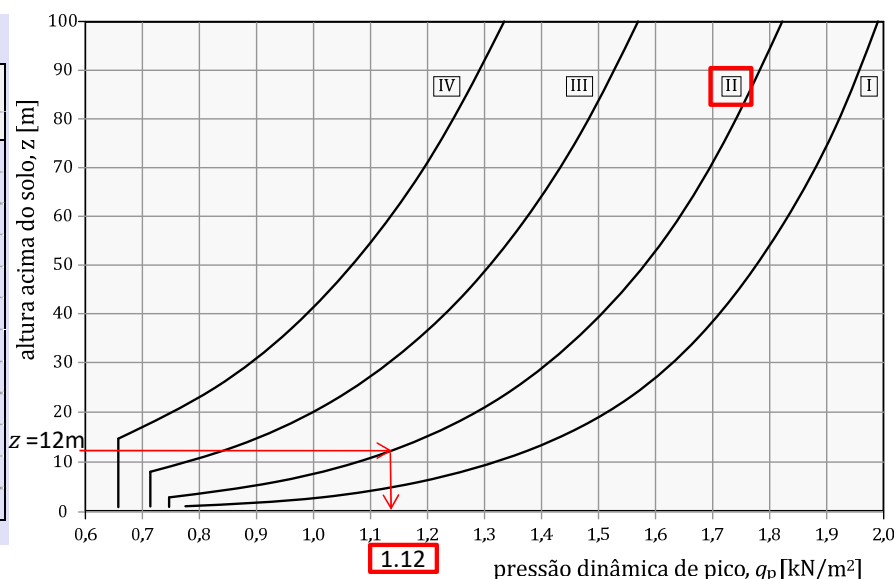
$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = [1 + 7 I_v(z)] \cdot c_r^2(z) \cdot c_o^2(z)$$



Perfis em altura do coeficiente de exposição ($c_o = 1,0$)

Velocidade do vento e pressão de pico ($V_b = 27 \text{ m/s}, c_o = 1,0$)

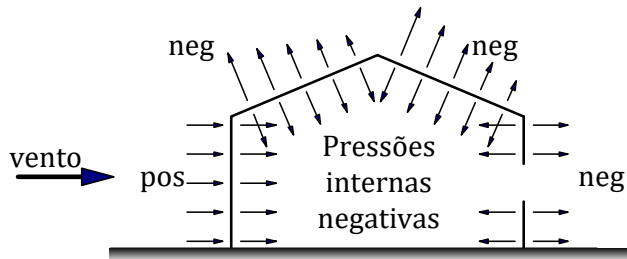
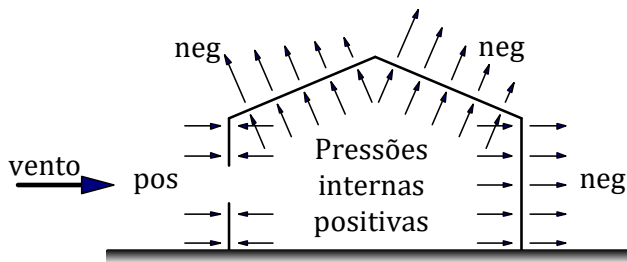
Zona A z [m]	Velocidade média [m/s]				Pressão de pico [kN/m ²]			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2	26,2	21,0	19,1	17,1	0,93	0,75	0,71	0,66
5	30,2	23,6	19,1	17,1	1,14	0,88	0,71	0,66
10	33,2	27,2	20,4	17,1	1,32	1,07	0,78	0,66
15	35,0	29,3	22,8	17,1	1,43	1,19	0,90	0,66
20	36,2	30,7	24,4	19,0	1,51	1,28	0,99	0,75
25	37,2	31,9	25,7	20,4	1,57	1,35	1,07	0,82
30	38,0	32,8	26,8	21,5	1,63	1,41	1,13	0,89
40	39,2	34,3	28,5	23,3	1,71	1,50	1,23	0,99
50	40,2	35,4	29,8	24,8	1,78	1,58	1,31	1,07
60	41,0	36,4	30,8	25,9	1,83	1,64	1,38	1,14
80	42,3	37,8	32,5	27,7	1,92	1,74	1,49	1,25
100	43,2	39,0	33,8	29,1	1,99	1,83	1,57	1,34



NOTA: velocidade (zona B) = (30/27) velocidade (zona A)

pressão dinâmica (zona B) = (30/27)² pressão dinâmica (zona A)

Perfis da pressão dinâmica de pico, $q_p(z)$, para a zona A ($V_b = 27 \text{ m/s}, c_o = 1,0$)



Acção estática equivalente – Pressão normal às superfícies dada em $[N/m^2]$ por:

$$\text{Exterior} \quad w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

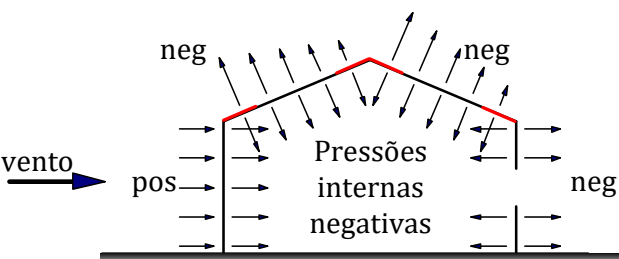
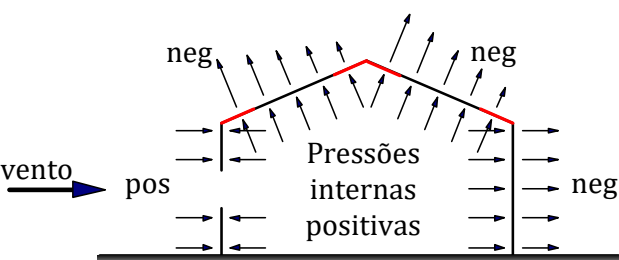
$$\text{Interior} \quad w_i = c_{pi} \cdot q_p(z_i)$$

em que:

c_{pe} é o coeficiente de pressão exterior à altura z_e

c_{pi} é o coeficiente de pressão interior à altura z_i

NOTA – Os efeitos da pressão interior devem somar-se vectorialmente aos da pressão exterior se forem desforáveis na maioria das faces.



Em relação aos coeficientes de pressão interiores, c_{pi} , são aplicáveis as seguintes regras simplificadas para edifícios correntes:

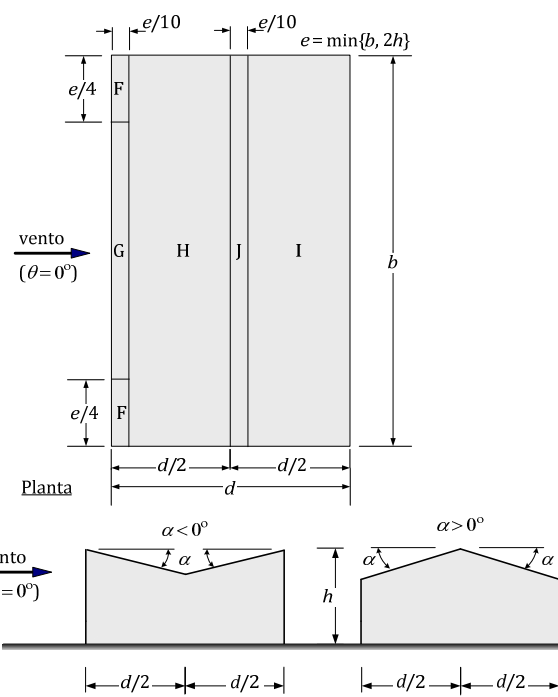
- ✓ Quando a razão $\Omega = \text{área de aberturas da face predominante} / \text{área total das aberturas nas faces restantes} \geq 2$ então $c_{pi} = \chi \cdot c_{pe}$, tal que, $\chi(\Omega = 2) = 0,75$ e $\chi(\Omega \geq 3) = 0,90$
- ✓ Quando não existir uma face predominante, o valor de c_{pi} pode ser tomado com o valor de $+0,2$ ou $-0,3$ consoante for mais desfavorável, mas igual em todas as faces

No caso dos coeficientes de pressão exteriores c_{pe} , devem considerar-se:

- ✓ $c_{pe,10}$ – coeficientes para determinação dos efeitos globais numa estrutura da acção do vento
- ✓ $c_{pe,1}$ – coeficientes para determinação dos efeitos locais numa estrutura para a acção do vento (superfícies com área igual ou inferior a 1 m^2); ex. dimensionamento de revestimentos

Coefficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes

ângulo α	direcção do vento $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,6		-0,6	
							+0,2		+0,2	
0°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,2		-0,2	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		-0,6	
	+0,0		+0,0		+0,0				+0,2	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	

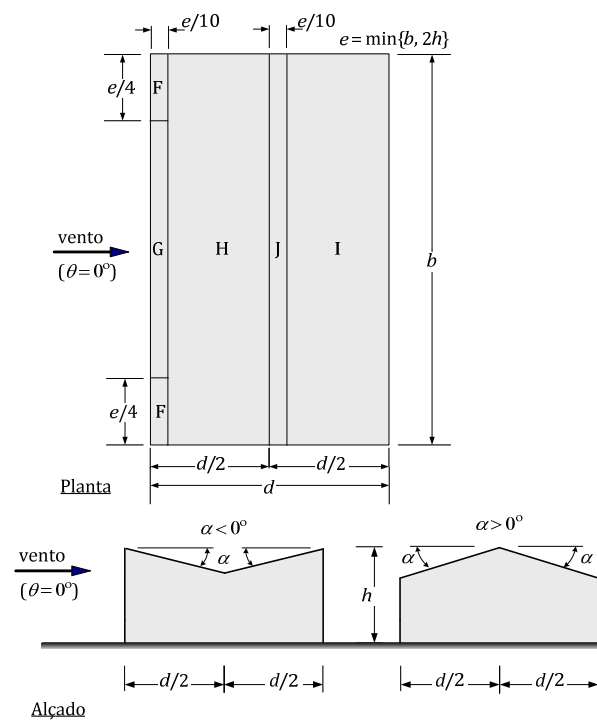
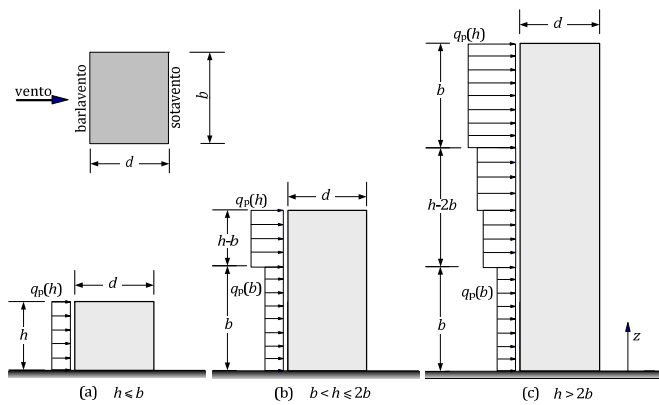


Notas: a) Para $\alpha \geq -5^\circ$ são fornecidos valores positivos e negativos para algumas zonas da cobertura. Nestas condições, devem ser considerados quatro casos de carregamento combinando os valores positivos ou negativos nas áreas F, G e H (vertente de barlavento) com os valores positivos ou negativos nas áreas I e J (vertente de sotavento), mas sem misturar, numa mesma vertente, a consideração de valores positivos com valores negativos.
 b) Para ângulos intermédios efectuar interpolação linear entre valores de c_{pe} com o mesmo sinal.

Coefficientes de pressão exterior para as paredes de barlavento e sotavento

h/d	parede de barlavento		parede de sotavento	
	$c_{pe,b,10}$	$c_{pe,b,1}$	$c_{pe,s,10}$	$c_{pe,s,1}$
5	+0,8		-0,7	
1	+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	+0,7		-0,3	

Notas: a) A variável d representa a dimensão do edifício, em planta, segundo a direcção do vento considerada (a largura das paredes de barlavento e sotavento é indicada por b).
 b) Para valores intermédios de h/d , pode ser utilizada interpolação linear.



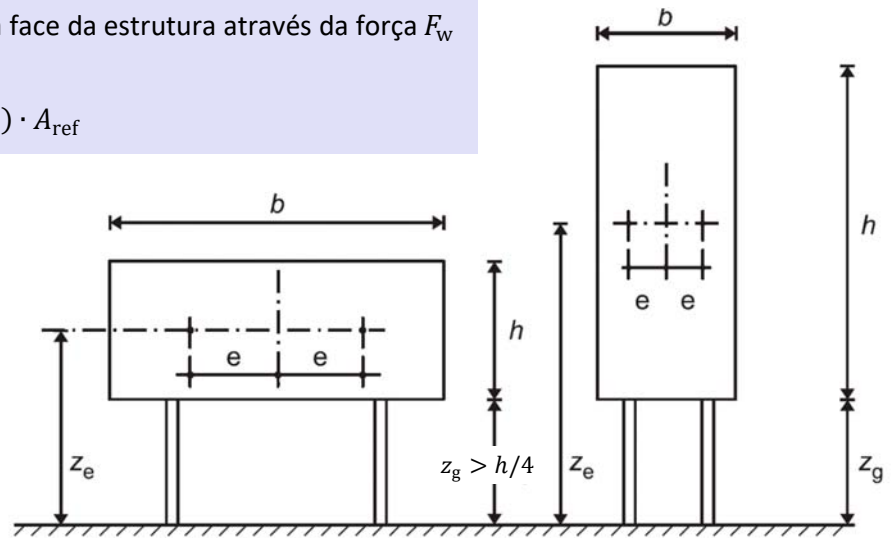
Para alguns casos o EC1-1-4 fornece coeficientes de força, c_f , quantificando de forma global o efeito da acção do vento numa face da estrutura através da força F_w obtida por:

$$F_w = c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Exemplo – Painel de sinalização tem-se:

$$c_f = 1,80$$

$$e = \pm b/4$$



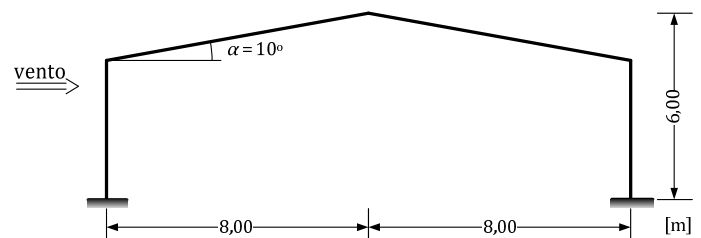
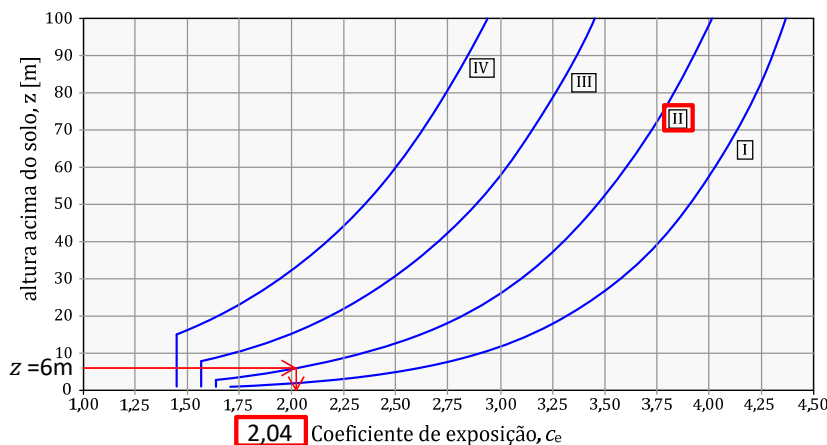
Altura de referência: $z_e = z_g + h/2$.

Área de referência: $A_{ref} = b \cdot h$.

Exemplo de quantificação da acção do vento

Edifício industrial com planta rectangular ($16 \times 30 \text{ m}^2$) em Leiria, a construir num terreno da categoria II em termos de rugosidade aerodinâmica. A estrutura principal do edifício é composta por pórticos paralelos afastados entre si de 6,00 m.

Objectivo – Definir para um pórtico intermédio a acção do vento para $\theta = 0^\circ$, considerando os coeficientes c_{dir} , c_{season} e $c_0(z)$ unitários.



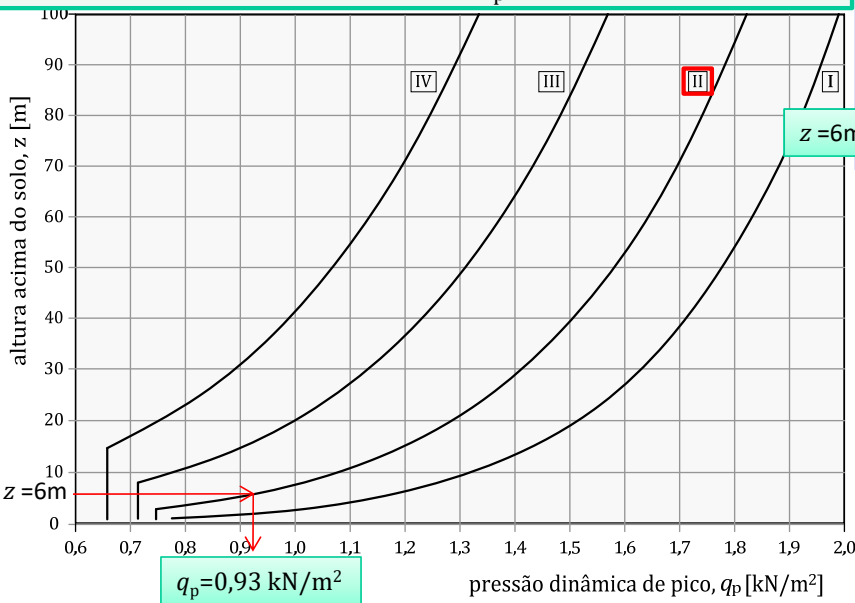
1] Pressão dinâmica

- Leiria - Zona A $\Rightarrow V_b = V_{b,0} = 27,0 \text{ m/s}$
- Terreno de categoria II $\Rightarrow c_e(z_e = 6 \text{ m}) = 2,04$
- Pressão dinâmica de pico à cota z_e :

$$q_d(z_e) = 2,04 \times 0,625 \times 27,0^2 = 929 \text{ N/m}^2$$

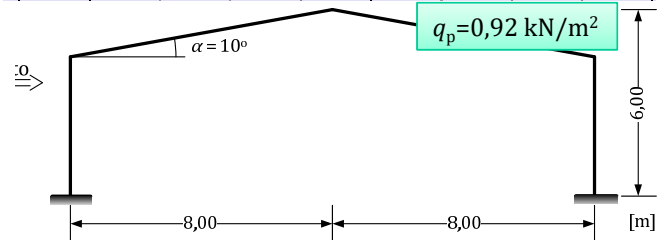
Exemplo de quantificação da acção do vento

Alternativa – obter directamente q_p do gráfico ou da tabela



Velocidade do vento e pressão de pico ($V_b = 27 \text{ m/s}, c_o = 1,0$)

Zona A z [m]	Velocidade média [m/s]				Pressão de pico [kN/m ²]			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2	26,2	21,0	19,1	17,1	0,93	0,75	0,71	0,66
5	30,2	23,6	19,1	17,1	1,14	0,88	0,71	0,66
10	33,2	27,2	20,4	17,1	1,32	1,07	0,78	0,66



1) Pressão dinâmica

- Leiria - Zona A => $V_b = V_{b,0} = 27,0 \text{ m/s}$
- Terreno de categoria II => $c_e(z_e = 6 \text{ m}) = 2,04$
- Pressão dinâmica de pico à cota z_e :
 $q_d(z_e) = 2,04 \times 0,625 \times 27,0^2 = 929 \text{ N/m}^2$

Exemplo de quantificação da acção do vento

2) Coeficientes de pressão interiores c_{pi}

O edifício não tem uma face predominante logo

$$c_{pi} = +0,2 \text{ ou } c_{pi} = -0,3.$$

3) Coeficientes de pressão exteriores $c_{pe,10}$

Nas paredes

- $d = 16 \text{ m} ; b = 30 \text{ m}$
- $h = 6 \text{ m} < b \Rightarrow q_p(z) = q_p(h)$
- $h/d = 6/16 = 0,38$

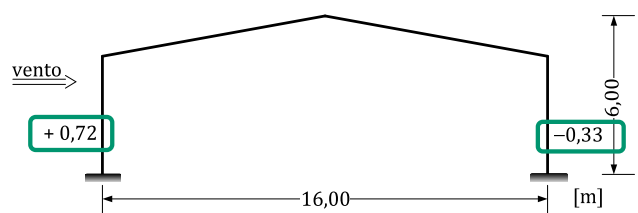
Logo Interpolação linear entre 0,25 e 1,0

Coeficientes de pressão exterior para as paredes de barlavento e sotavento

h/d	parede de barlavento		parede de sotavento	
	$c_{pe,b,10}$	$c_{pe,b,1}$	$c_{pe,s,10}$	$c_{pe,s,1}$
5	+0,8		-0,7	
1	+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	+0,7		-0,3	

Notas: a) A variável d representa a dimensão do edifício, em planta, segundo a direcção do vento considerada (a largura das paredes de barlavento e sotavento é indicada por b).

b) Para valores intermédios de h/d , pode ser utilizada interpolação linear.

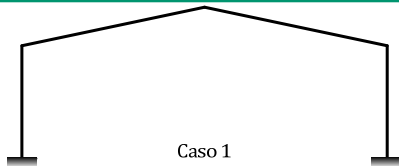
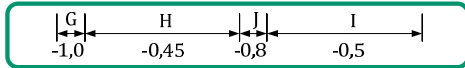


Exemplo de quantificação da acção do vento

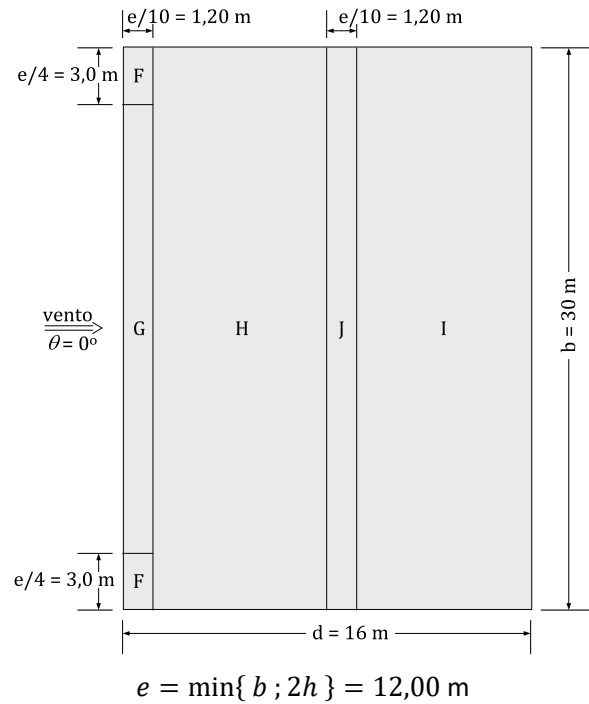
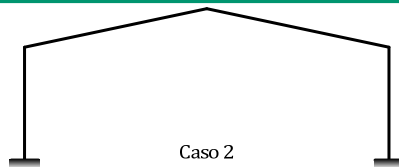
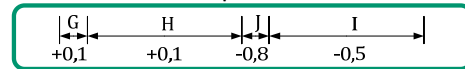
Na cobertura

Nas zonas G, H, I e J da cobertura com $\alpha = 10^\circ$, os valores de $c_{pe,10}$ devem considerar dois casos distintos:

1) caso 1- pressões exteriores negativas nas duas vertentes



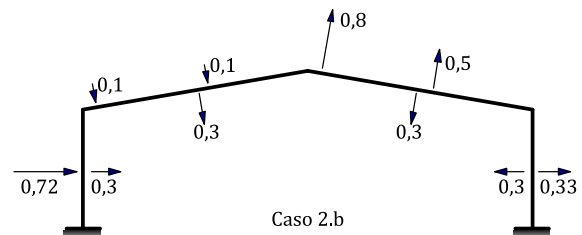
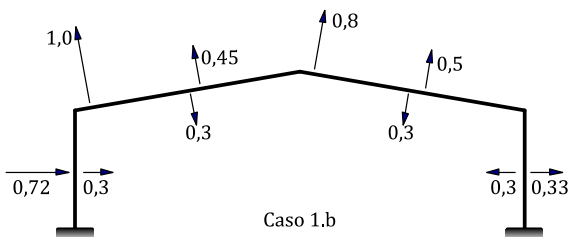
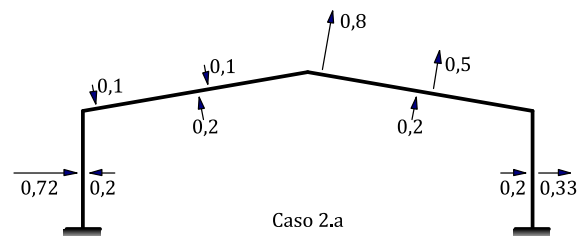
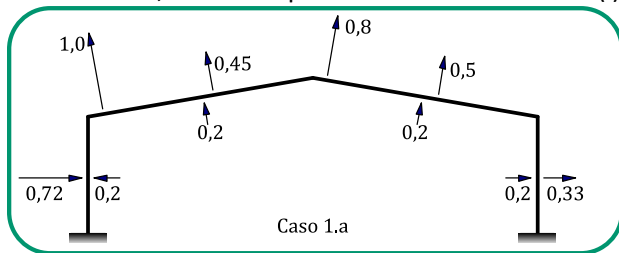
2) caso 2 - pressões exteriores positivas na vertente de sotavento



Exemplo de quantificação da acção do vento

4) Soma dos coeficientes de pressão ($c_{pe} \pm c_{pi}$)

Os dois casos relativos às pressões exteriores devem ser conjugados com outros dois casos distintos relativos às pressões interiores, em correspondência com os valores (i) $c_{pi} = +0,2$ e (ii) $c_{pi} = -0,3$, dando origem aos quatro casos distintos.



Exemplo de quantificação da acção do vento

5] Cargas a aplicar num dos pórticos intermédios ($\theta = 0^\circ$, caso 1.a)

Tendo em conta o valor da pressão dinâmica de pico à altura de referência, $q_p(z_e) = 929 \text{ N/m}^2$, e o valor do afastamento entre pórticos é igual a 6,0 m, obtêm-se as cargas a aplicar num pórtico [kN/m]

