

Eurocódigo 1 – Acções em estruturas

Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento

Pedro Mendes

Eurocódigos Estruturais: o início da sua aplicação em Portugal

LNEC, Maio de 2010

Campo de aplicação da NP EN 1991-1-4

- **Edifícios** e outras obras de engenharia civil com **alturas inferiores a 200 m**;
- **Pontes** em que nenhum tramo tenha um vão superior a **200 m**, desde que satisfaçam um determinado conjunto de critérios relativos à resposta dinâmica.

A Norma não fornece orientações relativamente a diversos aspectos, como sejam:

- vibrações de torção (por exemplo, em edifícios altos com um núcleo central);
- vibrações de tabuleiros de pontes devidas à turbulência transversal do vento;
- acções do vento em pontes suspensas ou de tirantes;
- vibrações em que seja necessário considerar outros modos de vibração para além do fundamental.

Modelação das acções do vento

A **acção do vento** sobre as construções é representada por um **conjunto simplificado de pressões** ou **de forças** cujos efeitos são equivalentes aos efeitos extremos do vento, tendo em conta a turbulência atmosférica.

Valores característicos das **pressões** (exteriores ou interiores) exercidas pelo vento nas superfícies de uma construção:

$$w_e = c_{pe} q_p(z_e)$$

$$w_i = c_{pi} q_p(z_i)$$

z_e , z_i - **alturas de referência** para a pressão em causa,

c_{pe} , c_{pi} - **coeficientes de pressão** apropriados,

q_p - **pressão dinâmica de pico**.

Secção 4 – Velocidade do vento e pressão dinâmica

a) Valor de referência da velocidade do vento - V_b

Valor com uma probabilidade anual de ser excedido igual a 0,02
(período médio de retorno = 50 anos)

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

$V_{b,0}$ - (**valor básico**) valor característico da velocidade média 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;

c_{dir} - **coeficiente de direcção** (= 1,0);

c_{season} - **coeficiente de sazão** (= 1,0).

b) Velocidade média do vento a uma altura z acima do solo - $V_m(z)$

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

$c_o(z)$ - **coeficiente de orografia** ($=1,0$, a não ser que, devido à orografia local, as velocidades do vento sejam majoradas significativamente)

$c_r(z)$ - **coeficiente de rugosidade**:

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min}$$

z_0 - **comprimento de rugosidade** para a categoria de terreno em causa

k_r - **coeficiente de terreno**

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

c) Turbulência longitudinal do vento

□ Admite-se que o desvio-padrão das flutuações de velocidade do vento (σ_v) é constante em altura.

$$\sigma_v = k_1 k_r V_b$$

k_1 - coeficiente de turbulência (=1,0).

□ Intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z) = \sigma_v/V_m(z)$:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_o(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z < z_{\min}$$

d) Pressão dinâmica de pico – $q_p(z)$

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

$$\Rightarrow q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] c_r^2(z) c_o^2(z) \frac{1}{2} \rho V_b^2$$

Definindo a **pressão dinâmica de referência** (q_b) através de:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2$$

resulta:

$$q_p(z) = c_e(z) q_b$$

$c_e(z)$ – **coeficiente de exposição**

$$c_e(z) = [1 + 7 I_v(z)] c_r^2(z) c_o^2(z)$$

Regras especificadas no Anexo Nacional

- Valor básico da velocidade de referência do vento

Zonamento do País análogo ao definido no RSA, com:

$$V_{b,0}(\text{zona A}) = 27 \text{ m/s}$$

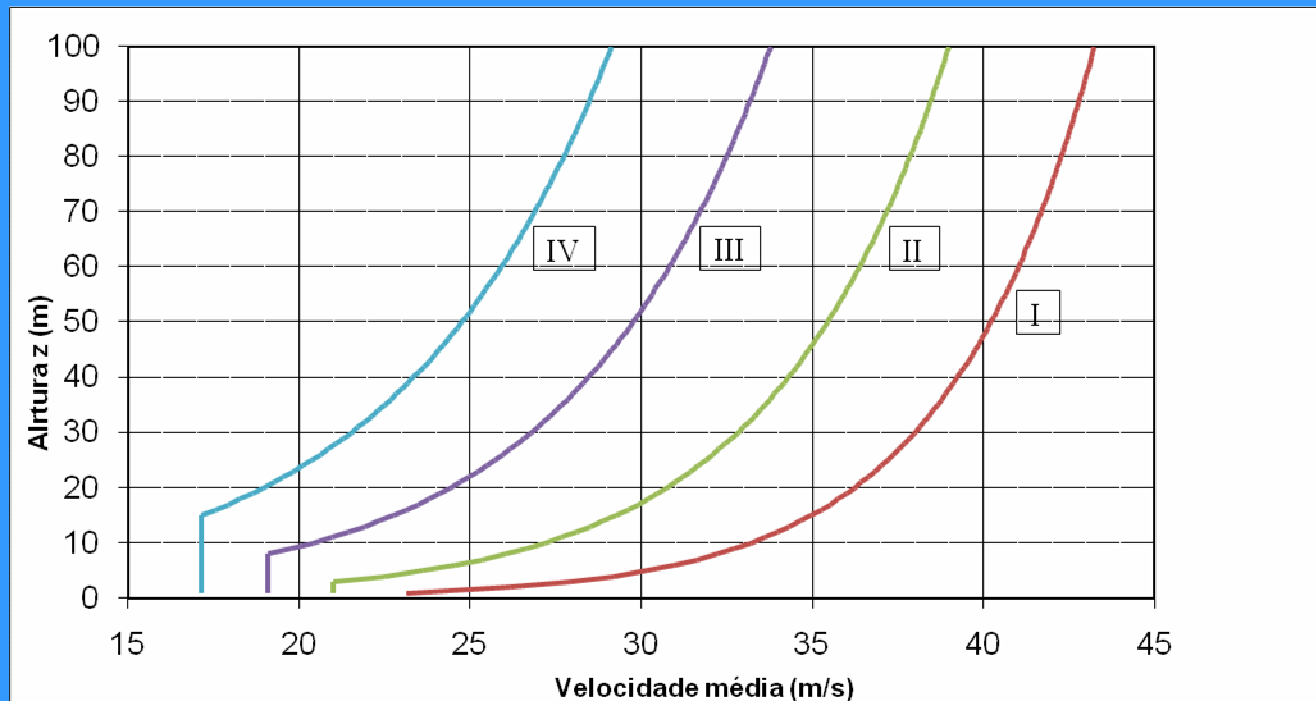
$$V_{b,0}(\text{zona B}) = 30 \text{ m/s}$$

- $c_{dir} \geq 0,85$ $c_{season} \geq 0,90$

- Categorias de terreno e respectivos parâmetros (z_0 e z_{min})

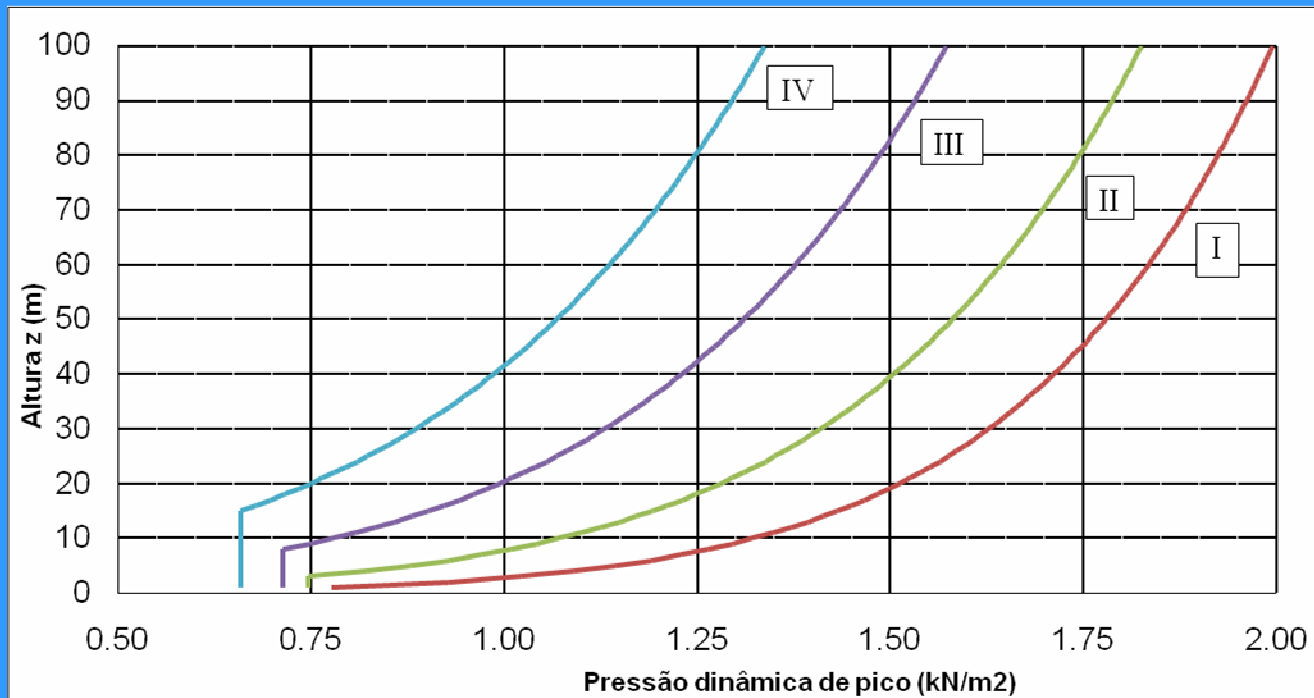
	Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar, lagos extensos	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua 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

Velocidade média do vento (Zona A, $c_0=1,0$)



$$c_0(z)=1,0 \Rightarrow V_m(z) = c_r(z) V_b$$

Pressão dinâmica de pico (Zona A, $c_0=k_1=1,0$)



$$q_p(z) = c_e(z) q_b$$

Regras especificadas no Anexo Nacional (cont.)

- A categoria de terreno a considerar para uma dada direcção do vento depende da rugosidade do solo e da **extensão (para barlavento da construção) com rugosidade de terreno uniforme dentro dum sector angular de 30°** definido por $\pm 15^\circ$ em relação à direcção do vento.
- (**Extensão para barlavento**) Se a construção em causa estiver próxima de uma alteração de rugosidade do terreno, designadamente:
 - a menos de **2 km** no caso de transição de uma superfície de categoria I,
OU
 - a menos de **1 km** de transição dum terreno menos rugoso de categoria II ou III,deverá ser utilizada a categoria de terreno **menos** rugosa.

Secção 5 – Acções do vento

As **forças** (F_w) exercidas pelo vento sobre uma construção ou sobre um componente desta podem ser determinadas por uma de duas vias:

- 1) a partir das **pressões** nas superfícies (o que, no caso geral, corresponderá a uma soma vectorial abrangendo as forças resultantes das pressões exteriores e interiores, $F_{w,e}$ e $F_{w,i}$, e as forças de atrito, F_{fr});
- 2) a partir de **coeficientes de força** (c_f) apropriados.

Neste último caso:

$$F_w = (c_s c_d) c_f [q_p(z_e) A_{ref}]$$

$c_s c_d$ - **coeficiente estrutural**,

A_{ref} - **área de referência** definida para a situação em causa.

No primeiro caso (cálculo de F_w com base em **coeficientes de pressão** definidos para cada uma das superfícies individuais):

$$F_{w,e} = c_s c_d \sum c_{pe} q_p(z_e) A_{ref}$$

$$F_{w,i} = \sum c_{pi} q_p(z_i) A_{ref}$$

$$F_{fr} = c_{fr} q_p(z_e) A_{fr}$$

A_{fr} – área de superfície exterior paralela ao vento

c_{fr} – **coeficiente de atrito**

Valores de c_{fr} para superfícies de paredes ou coberturas

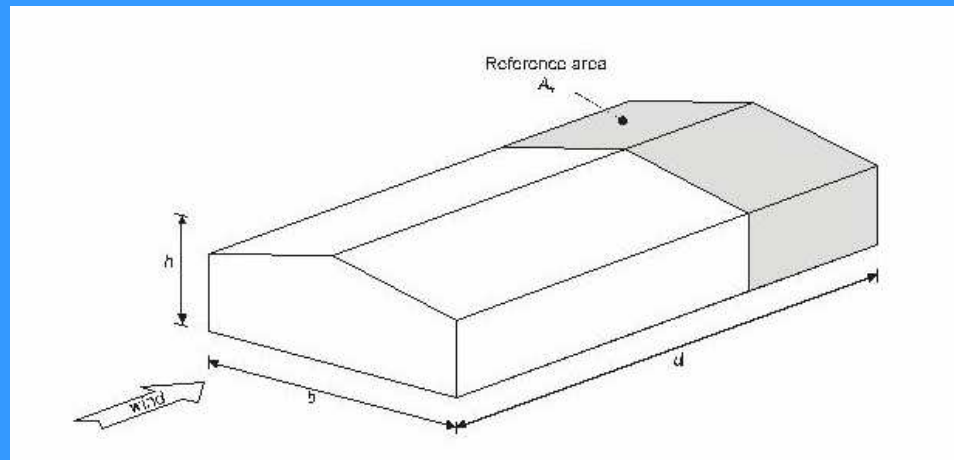
Superfícies lisas (ex.: aço, betão liso) $c_{fr} = 0,01$

Superfícies rugosas (ex.: betão rugoso) $c_{fr} = 0,02$

Superfícies muito rugosas

(ex.: com ondulações, nervuras) $c_{fr} = 0,04$

Em edifícios, deverão ser aplicadas forças de atrito na parte das superfícies exteriores paralelas ao vento localizada para além duma certa distância dos bordos ou cantos de barlavento; tal distância é igual ao **menor valor de entre (2b) e (4h)**.



Em geral, os efeitos do atrito **podem ser ignorados** quando a área total das superfícies paralelas (ou pouco inclinadas) em relação ao vento é ≤ 4 vezes a área total das superfícies exteriores \perp ao vento (nos lados de barlavento e de sotavento).

Secção 6 - Coeficiente estrutural ($c_s c_d$)

Tem em conta os seguintes efeitos nas acções do vento:

- Efeito de redução devido à não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície da construção (c_s);
- Efeito de majoração associado às vibrações da estrutura devidas à turbulência do vento (c_d).

O valor de $c_s c_d$ pode ser considerado igual a 1 em casos como:

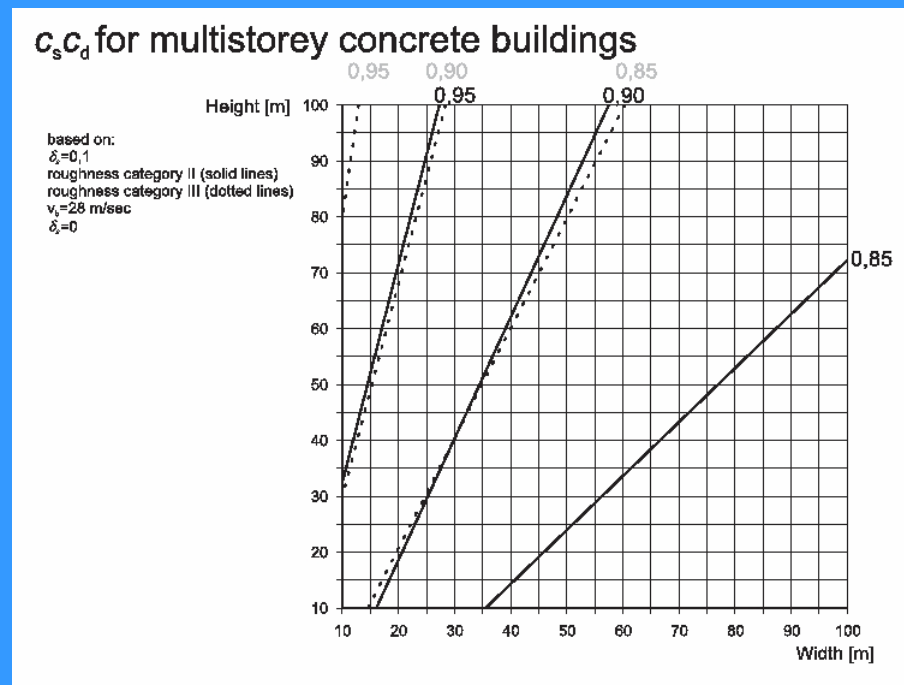
- a) edifícios de altura inferior a 15 m ;
- b) elementos de fachada e de cobertura cuja frequência própria seja superior a 5 Hz ;
- c) edifícios de estrutura porticada que contenham paredes resistentes e cuja altura seja tal que:

$$h < \min (100 \text{ m} ; 4.d)$$

(d - dimensão do edifício na direcção do vento)

$c_s c_d$ para edifícios ($h \geq \min(100 \text{ m}; 4.d)$) – Anexo D

Edifícios de estrutura de betão com vários pisos, de planta rectangular e com paredes exteriores verticais, com uma distribuição regular de rigidez e de massa.



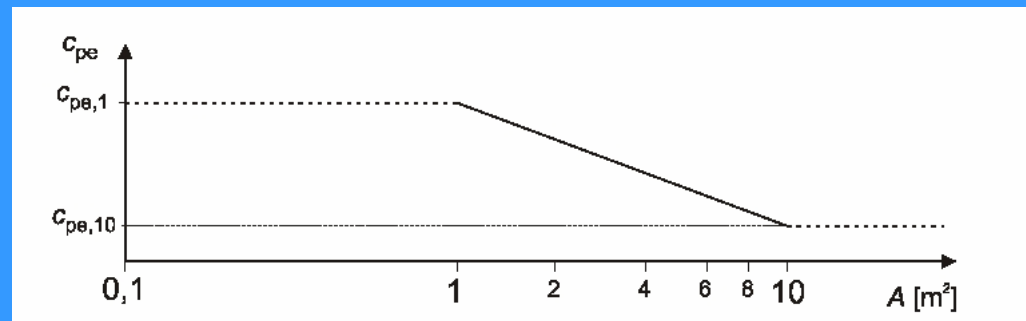
Nota: Para valores superiores a 1,1 poderá aplicar-se o procedimento pormenorizado.

Secção 7 - Coeficientes de pressão e de força

1.a)	c_{pe}/c_{pi}	-	edifícios cilindros de base circular
1.b)	$c_{p,net}$	-	coberturas isoladas paredes isoladas, platibandas e vedações
2)	c_f	-	coberturas isoladas painéis de sinalização elementos estruturais de secção transversal rectangular vivas regular elementos estruturais de secção com arestas elementos estruturais de secção poligonal cilindros de base circular esferas estruturas treliçadas bandeiras

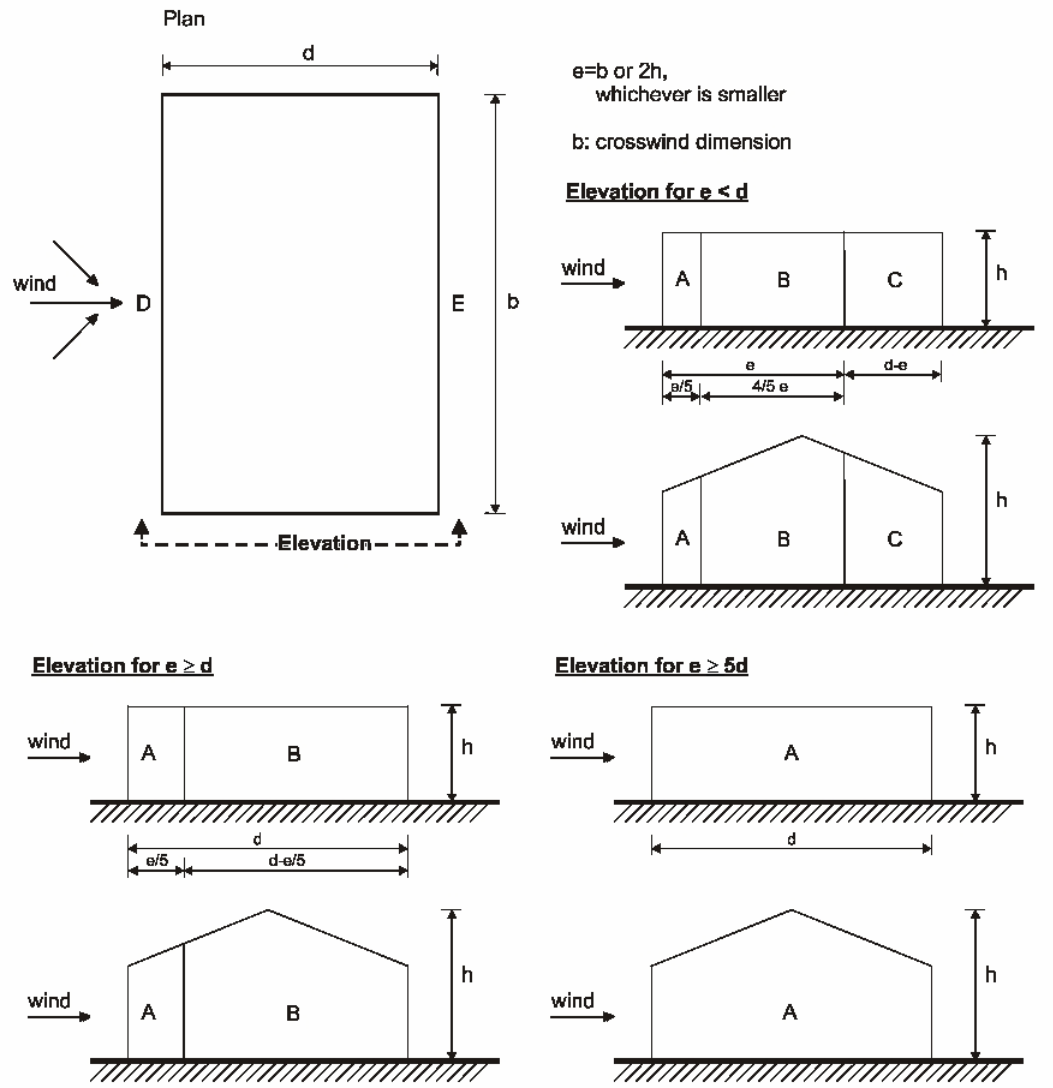
Coeficientes de pressão exterior para edifícios

7.2.1(1) Os coeficientes de pressão exterior c_{pe} aplicáveis a edifícios e a partes de edifícios dependem das dimensões da superfície carregada A , sendo esta a área da construção de que resulta a acção do vento na secção a ser calculada. Os coeficientes de pressão exterior são fornecidos para superfícies carregadas A de 1 m^2 e de 10 m^2 ..., sendo representados, respectivamente, por $c_{pe,1}$ (coeficientes locais) e por $c_{pe,10}$ (coeficientes globais).



NOTA 1: Os valores de $c_{pe,1}$ destinam-se ao cálculo de elementos de pequena dimensão e de ligações com uma área igual ou inferior a 1 m^2 , tais como elementos de revestimento e elementos de cobertura. Os valores de $c_{pe,10}$ poderão ser utilizados para o cálculo da estrutura resistente global de edifícios.

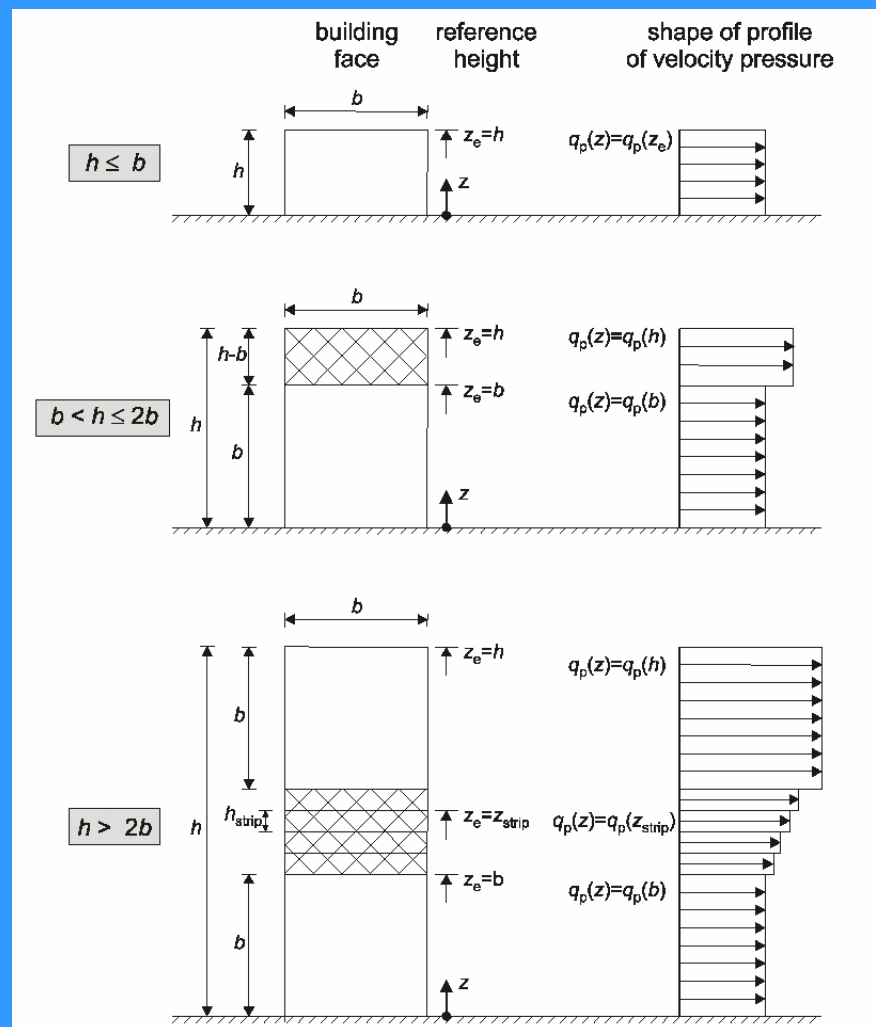
Coeficientes de pressão para paredes verticais de edifícios de planta rectangular



Coeficientes de pressão para paredes verticais de edifícios de planta rectangular

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

7.2.2(3) NOTA: A falta de correlação das pressões exercidas pelo vento, entre os lados de barlavento e de sotavento (zonas D e E), poderá ser considerada da seguinte forma: para edifícios com $h/d \geq 5$, a força resultante é multiplicada por 1; para edifícios com $h/d \leq 1$, a força resultante é multiplicada por 0,85; para valores intermédios de h/d , poderá ser efectuada uma interpolação linear.



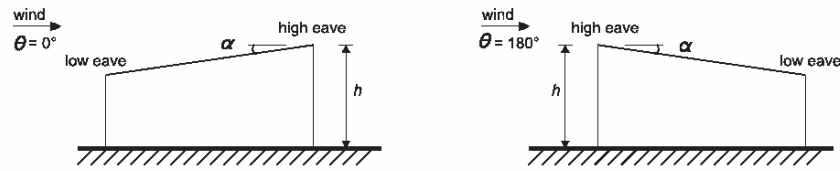
Coefficientes de pressão exterior em coberturas

A Norma fornece informações para os seguintes tipos de coberturas:

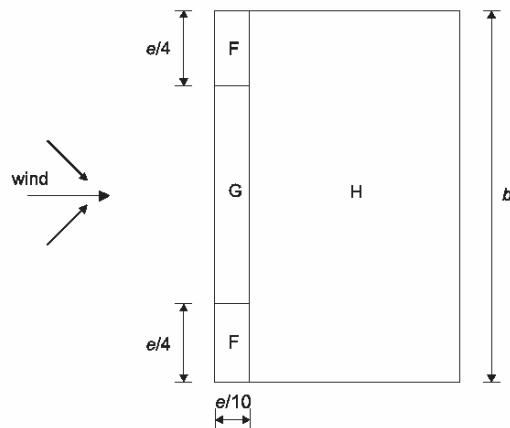
- 1) Coberturas de edifícios (c_{pe} , c_{pi})
 - 1.1) Coberturas em terraço
 - 1.2) Coberturas de uma vertente
 - 1.3) Coberturas de duas vertentes
 - 1.4) Coberturas de quatro vertentes
 - 1.5) Coberturas múltiplas
 - 1.6) Coberturas em abóbada e cúpulas

- 2) Coberturas isoladas (c_f , $c_{p,net}$)
 - 2.1) Coberturas isoladas de uma vertente
 - 2.2) Coberturas isoladas de duas vertentes
 - 2.3) Coberturas isoladas de múltiplas naves

Coberturas de uma vertente



(a) general

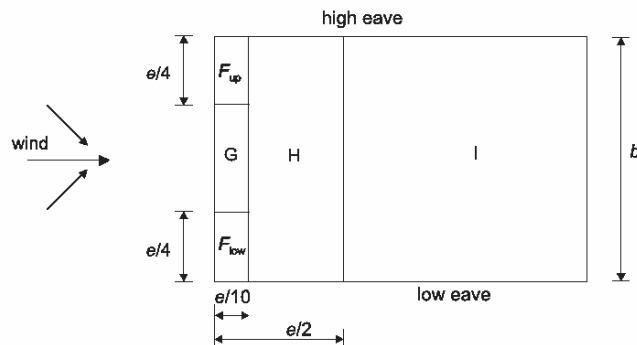


(b) wind directions $\theta = 0^\circ$ and $\theta = 180^\circ$

$$e = b \text{ or } 2h$$

whichever is smaller

b : crosswind dimension



(c) wind direction $\theta = 90^\circ$

Para $\theta=0^\circ$ e $\alpha \leq 45^\circ$, a Norma fornece valores + e - para c_{pe} ; em tais situações devem ser considerados **dois casos de carregamento** distintos - um correspondente a todos os valores de c_{pe} positivos e outro correspondente a todos os valores negativos.

Coberturas de uma vertente (direcções do vento: $\theta=0^\circ$ e $\theta=180^\circ$)

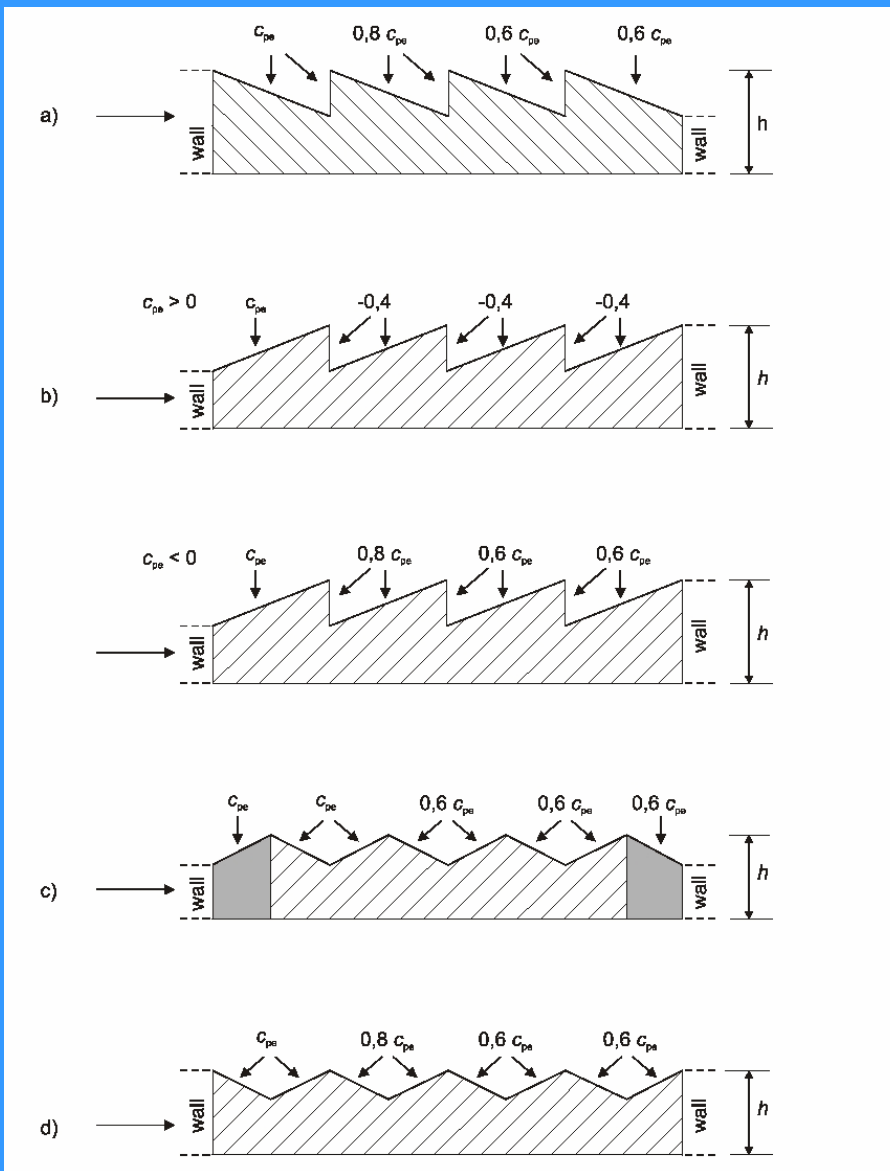
Ângulo α	ZONA; Direcção do vento $\theta=0^\circ$						ZONA; Direcção do vento $\theta=180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
	+0,0		+0,0		+0,0							
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
	+0,7		+0,7		+0,6							
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

Coberturas múltiplas

Os coeficientes de pressão aplicáveis a cada nave baseiam-se nos que são fornecidos para **coberturas de uma vertente** - situações a) e b) - e de **duas vertentes** - c) e d).

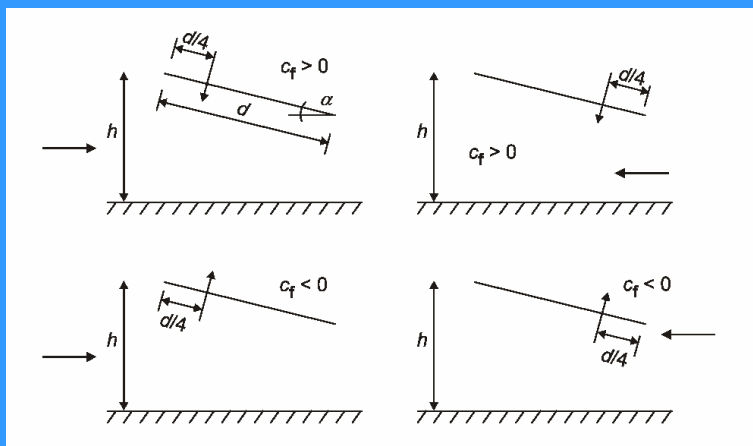
Na situação b) há que considerar dois casos distintos (consoante o sinal de c_{pe} na primeira nave).

Na situação c), o primeiro valor de c_{pe} corresponde ao de uma cobertura de uma vertente; os restantes correspondem aos de uma cobertura de duas vertentes com reversa.

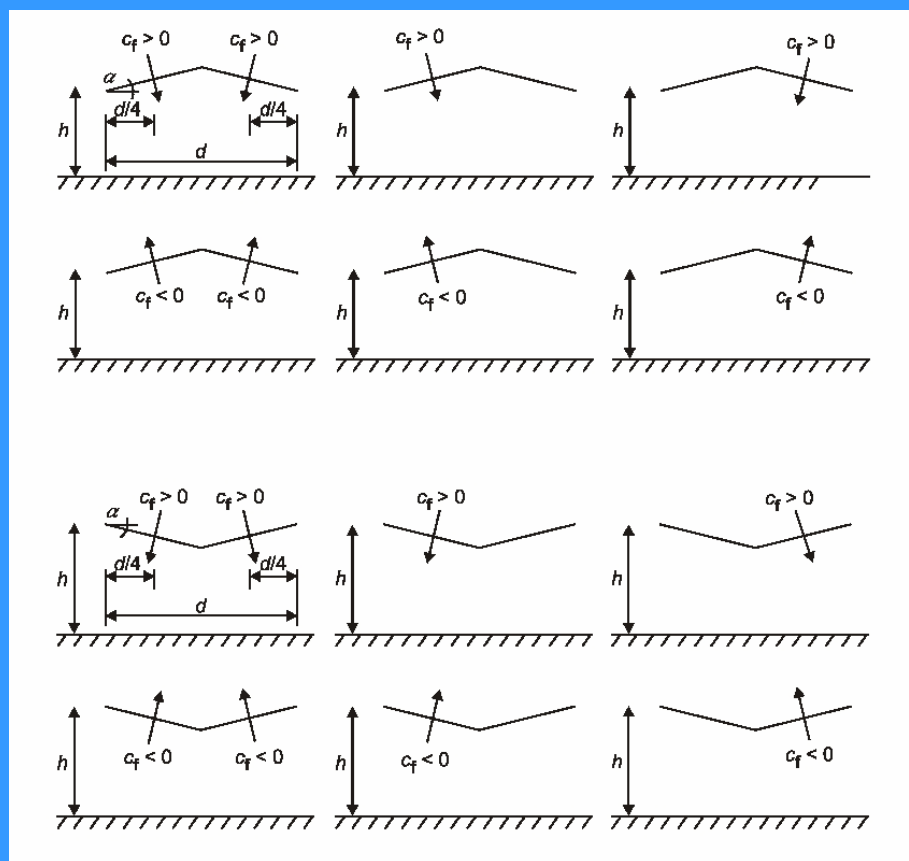


Coberturas isoladas - Disposição das cargas

Coberturas isoladas de uma vertente



Coberturas isoladas de duas vertentes



Coeficientes de pressão interior

7.2.9(4) “Uma face de um edifício deverá ser considerada como predominante quando a área das aberturas nessa face é pelo menos o dobro da área das aberturas ... nas faces restantes do edifício considerado.”

Casos de edifícios com uma face predominante (7.2.9(5))

a) se a área das aberturas na face predominante é igual ao dobro da área das aberturas nas faces restantes,

$$c_{pi} = 0,75 c_{pe}$$

b) se a área das aberturas na face predominante é igual a, pelo menos, três vezes a área das aberturas nas faces restantes,

$$c_{pi} = 0,90 c_{pe}$$

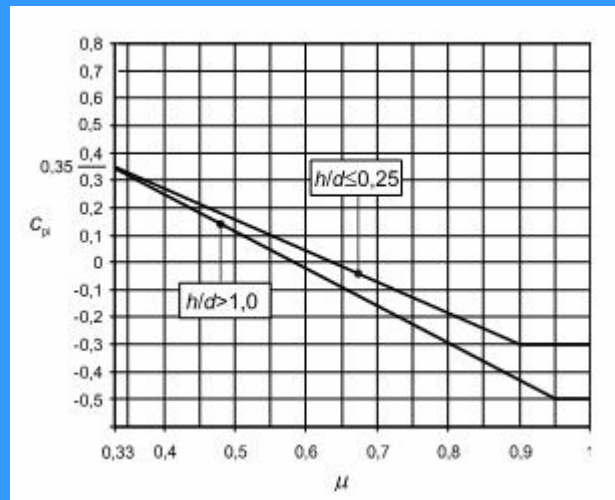
sendo c_{pe} o coef. de pressão exterior na face predominante ao nível das aberturas.

Coeficientes de pressão interior

Casos de edifícios sem uma face predominante (7.2.9(6))

$\mu = (\text{área total das aberturas com } c_{pe} < 0) / (\text{área total das aberturas})$

d – profundidade do edifício

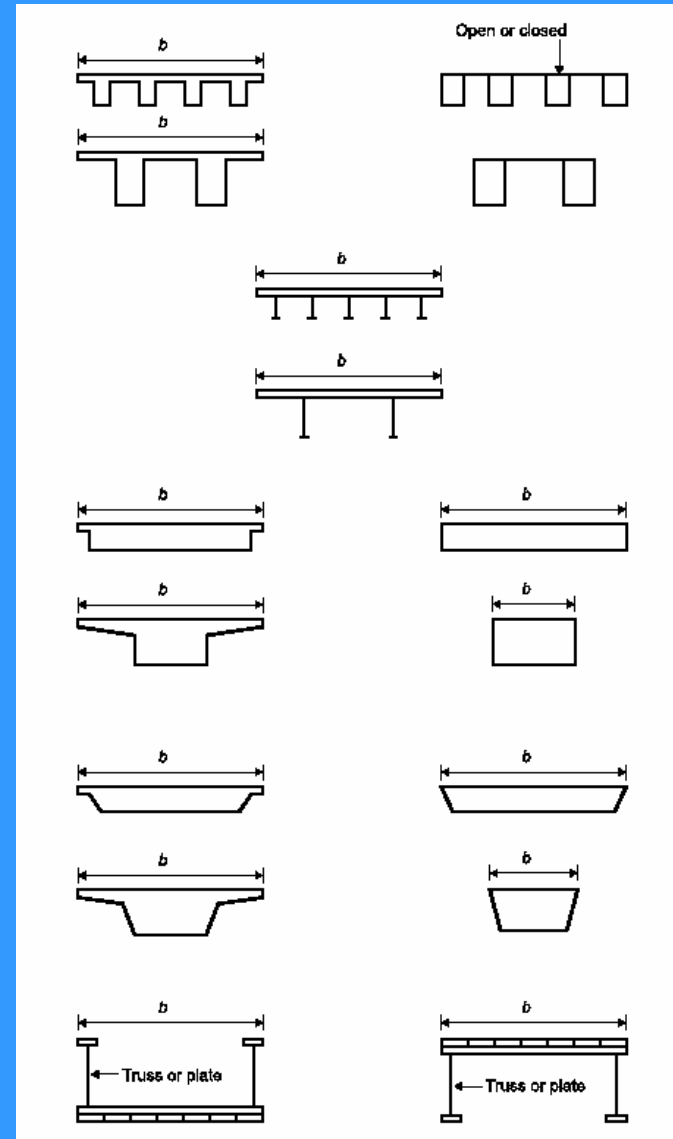


- Aplicável a fachadas e a coberturas de edifícios com ou sem divisórias interiores.
- Quando não se justifique ou não seja possível calcular μ para um determinado caso, c_{pi} deverá ser considerado com o valor mais gravoso de entre **+0,2** e **-0,3**.

Secção 8 - Acções do vento em pontes

8.1(1) A presente secção aplica-se apenas a pontes de tabuleiro único, com um ou mais tramos, de altura constante e com secções transversais conforme as representadas na Figura 8.1.

NA – Sem prejuízo do disposto em 1.1(2) e 1.1(11), a secção 8 também pode ser aplicada ..., com as necessárias adaptações, a pontes com tabuleiro de altura variável com secções transversais de entre as representadas na Figura 8.1.



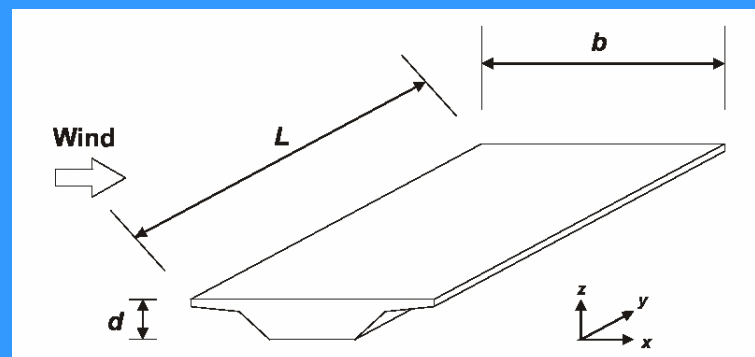
Forças exercidas pelo vento sobre os tabuleiros

No caso de tabuleiros de **pontes rodoviárias e ferroviárias normais com vão inferior a 125 m**, não é necessário, em geral, utilizar um procedimento de cálculo de resposta dinâmica ($c_s c_d$ poderá ser considerado = 1,0).

Para este efeito, poderá considerar-se que as **pontes normais** incluem as pontes de aço, de betão, de alumínio ou de madeira, assim como as construções mistas, cuja forma das secções transversais do tabuleiro seja abrangida, de um modo geral, pela Figura 8.1.

(note-se que esta disposição diz respeito à avaliação dos efeitos do vento sobre o tabuleiro nos termos da secção 8 da Norma, pelo que não abrange alguns efeitos específicos – como sejam as vibrações verticais de tabuleiros.

Nota – O cálculo da resposta dinâmica de tabuleiros de pontes envolve, em geral, a consideração de vários modos de vibração, pelo que o procedimento descrito em 6.3.1 não é directamente aplicável.



Coeficientes de força na direcção x

Para pontes normais, c_{fx} poderá ser considerado igual a **1,3**.

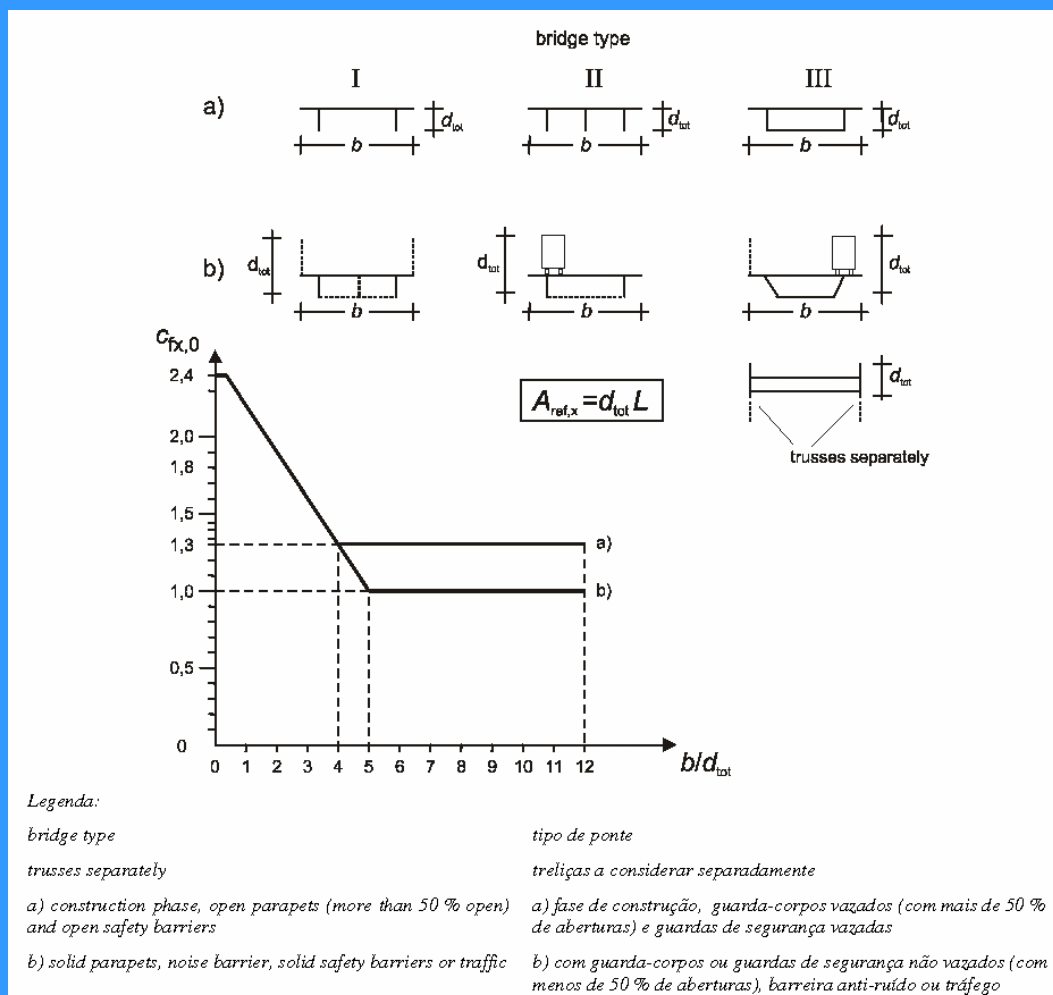
Em alternativa, c_{fx} poderá ser obtido da Figura 8.3.

Tabuleiros com **inclinação transversal** –

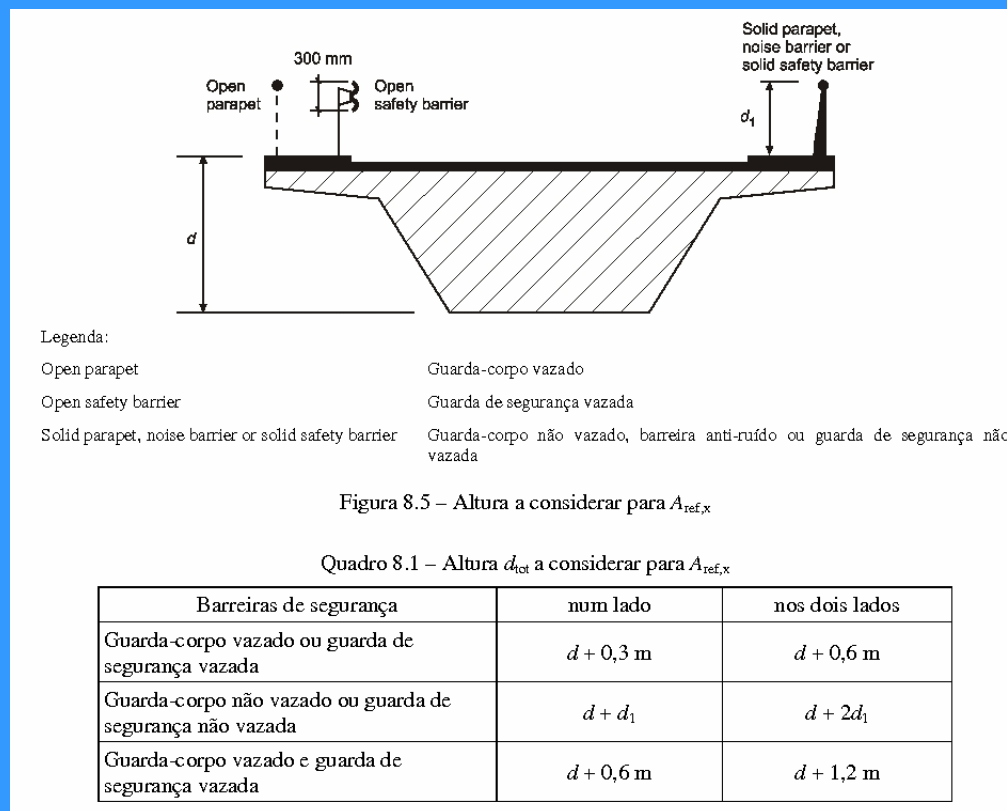
- c_{fx} deverá ser aumentado de **3 %** por grau de inclinação (máx. 25%).

Tabuleiros com a **face exposta ao vento inclinada em relação à vertical** –

- c_{fx} poderá ser reduzido de **0,5 %** por grau de inclinação (máx. 30%).



Forças na direcção x – Área de referência a considerar ($A_{ref,x} = d_{tot} \cdot L$)



Para combinações de acções com **carga de tráfego**, considerar a seguinte altura para $(d_{tot}-d)$, caso a área de referência resultante seja maior:

- a) **Pontes rodoviárias** – altura de 2 m a partir do nível da plataforma de rodagem;
- b) **Pontes ferroviárias** – altura de 4 m a partir do nível superior dos carris.