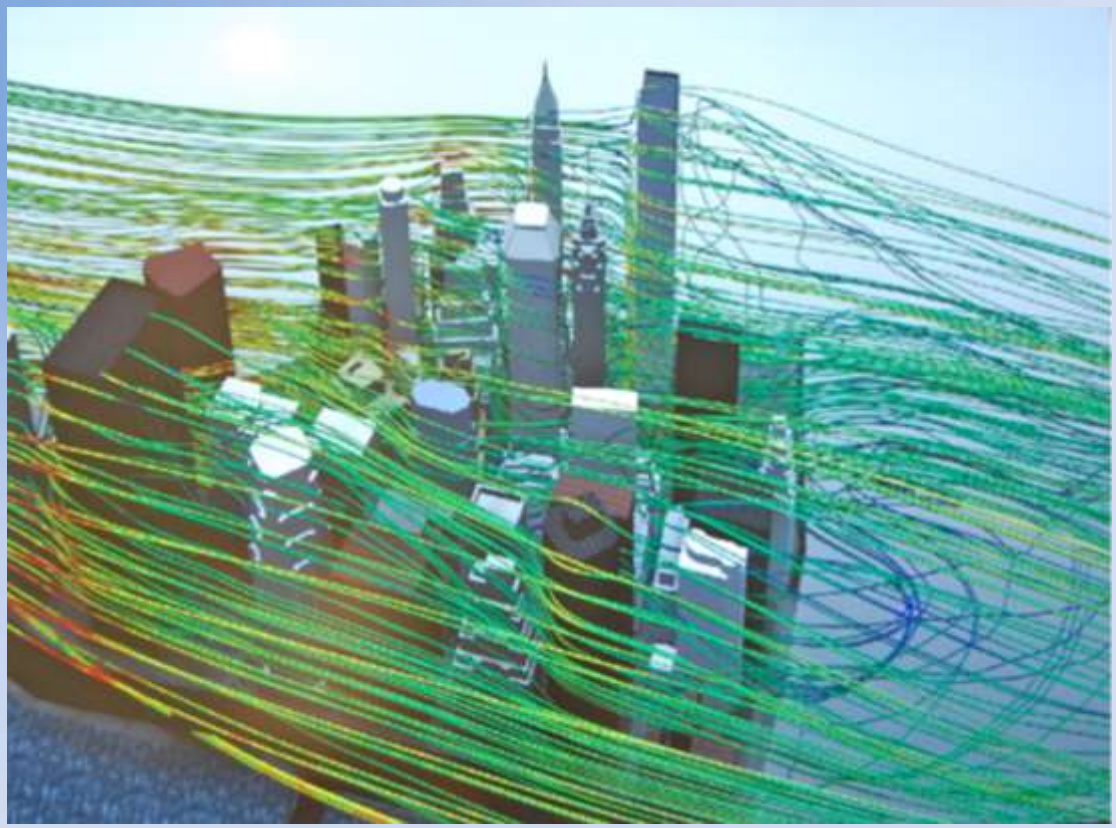
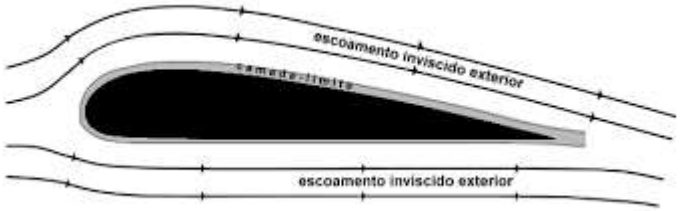


PEF 3522 – Ação do Vento das Edificações (Parte II)

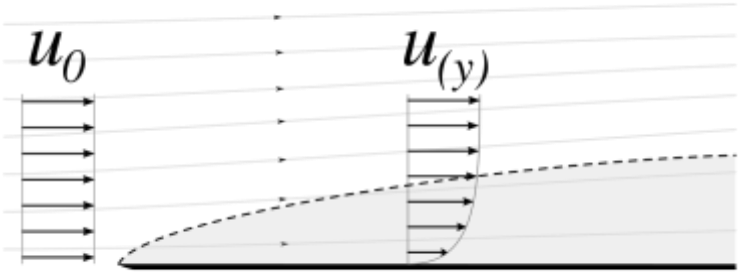
Prof. Henrique Campelo Gomes
Prof. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
2019

➢ Camada Limite

Quando o número de Reynolds é alto (forças viscosas desprezíveis frente às forças de inércia), o escoamento pode ser estudado como o de um fluido sem viscosidade em quase todo seu domínio: exceto numa fina camada. Esta é chamada de camada limite.



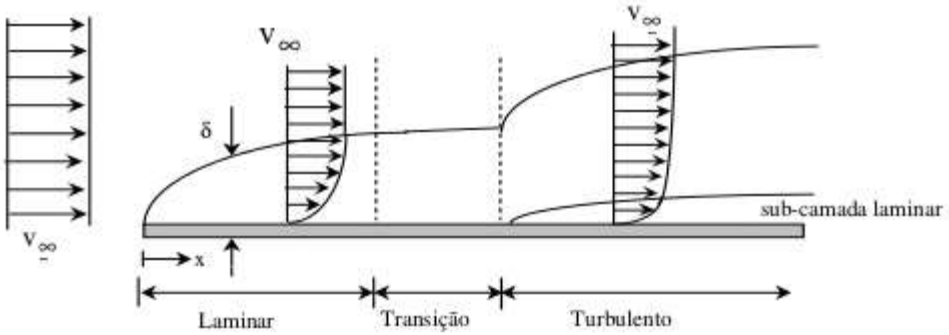
A velocidade na camada limite varia desde zero, na superfície fixa, até o valor da linha de corrente não perturbada.



Na teoria de Prandtl, mostra-se que a pressão estática não varia ao longo da espessura da camada limite. Ensaios experimentais também confirmam este resultado.

➢ Camada Limite

Camada Limite numa Placa Plana: num primeiro trecho, a camada limite é laminar. Depois se torna turbulenta, aumentando sua espessura. O trecho de transição é muito curto, podendo ser desprezado para fins práticos



Exemplo numérico:

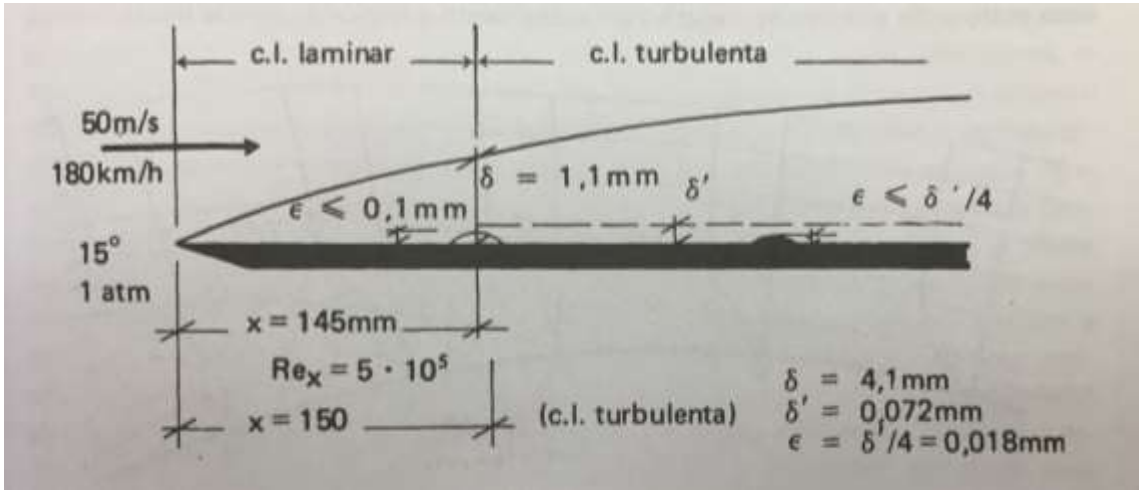
V_∞=50 m/s (180 km/h)

ν=0,145 cm²/s (Ar a 15°C e 1 atm)

δ=1,1 mm (laminar)

δ=4,1 mm (turbulenta)

δ'=0,072 mm (subcamada laminar)



ε= rugosidade superficial. Valor de referência abaixo do qual não se observam alterações do escoamento na camada limite

➢ Camada Limite

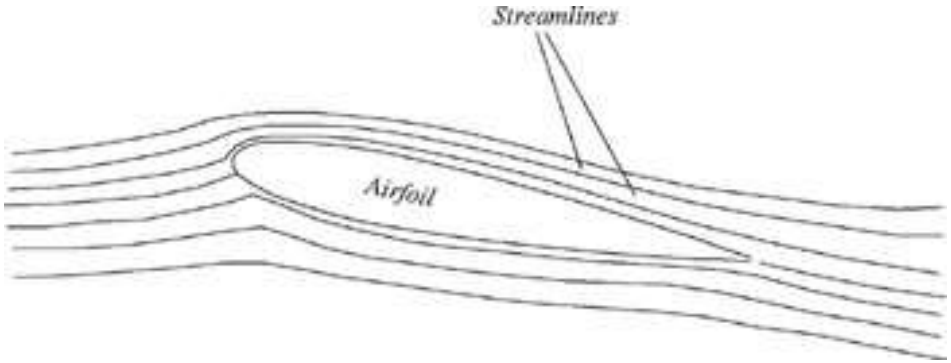
Características Importantes:

✓ Em uma pequena distância a partir da superfície da placa, a velocidade cresce de zero até, praticamente, a velocidade existente no escoamento teórico

✓ Na camada limite predominam os efeitos viscosos; fora dela a viscosidade quase não tem efeito sobre o escoamento

✓ Quanto maior a velocidade do escoamento, menor a espessura da camada limite

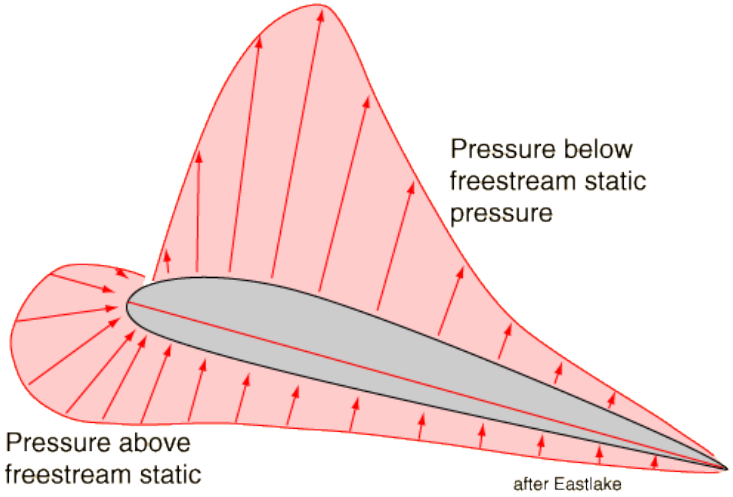
✓ A pressão no interior da camada limite é constante e determinada pelo escoamento circundante na seção perpendicular à superfície



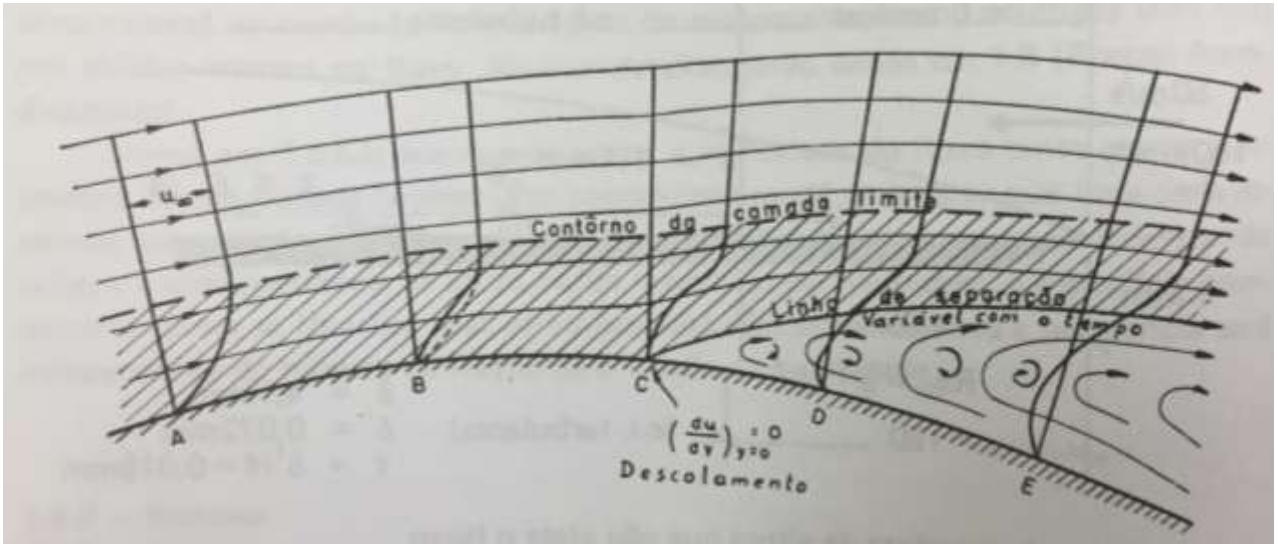
(camada limite aderida)

➢ Separação da Camada Limite



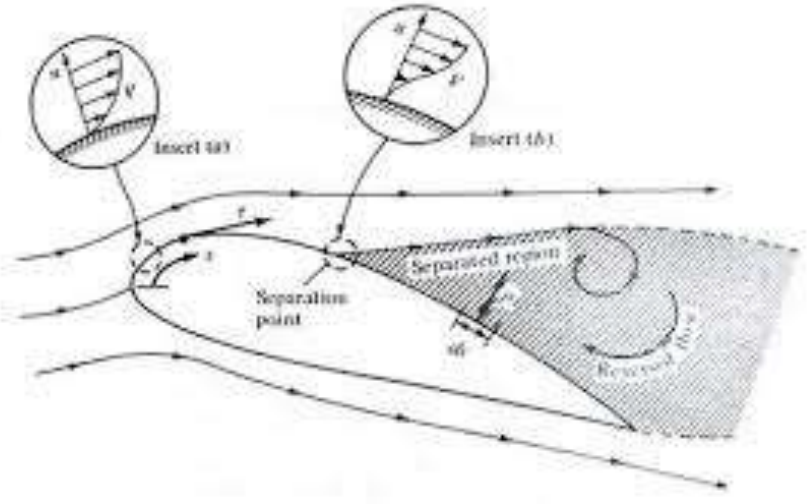


Pressure profile around airfoil



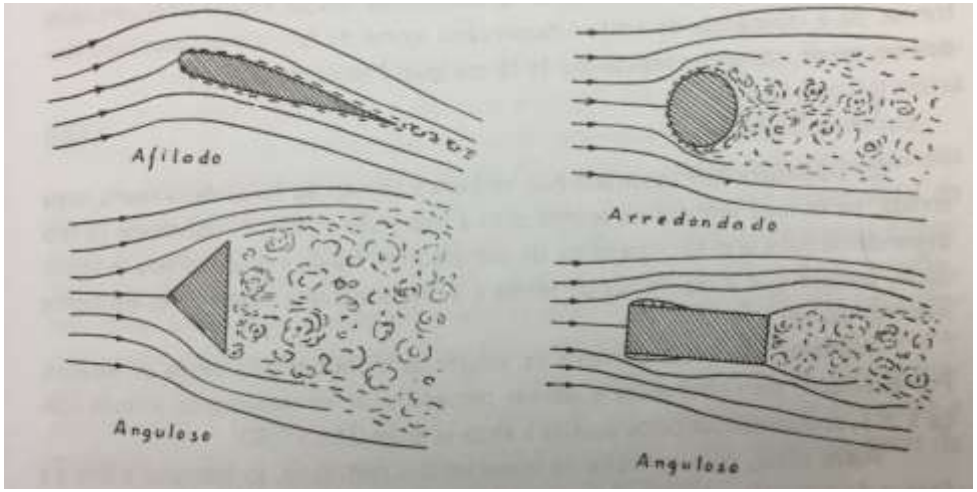
A separação é causada pela combinação das pequenas velocidades existentes na camada limite, próxima à superfície fixa, e de um gradiente adverso de pressão (contrário ao escoamento no contorno da camada limite)

➢ Separação da Camada Limite





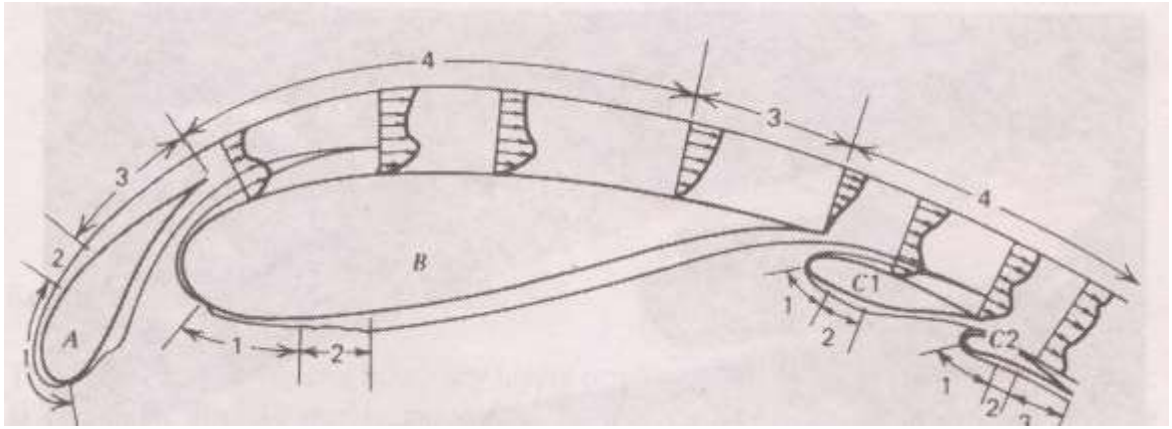
Corpos Rombudos (arredondados ou angulosos):



À jusante do ponto de separação, observa-se a formação de turbilhões e vórtices. Nesta região, chamada de esteira, a pressão baixa (sucção) aumenta significativamente a força resultante atuante no corpo na direção do escoamento (arrasto).

➢ Separação da Camada Limite

Algumas técnicas para evitar a separação da camada limite:



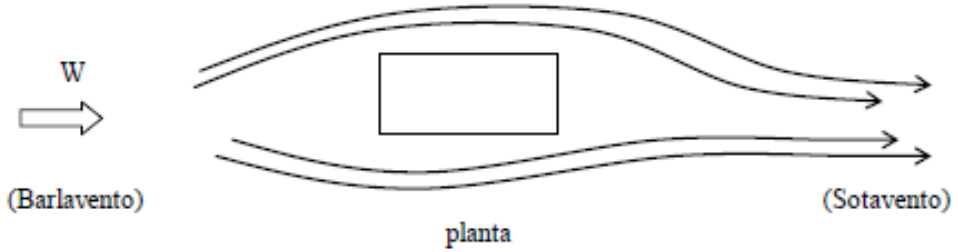
Aceleração (energização) da camada limite

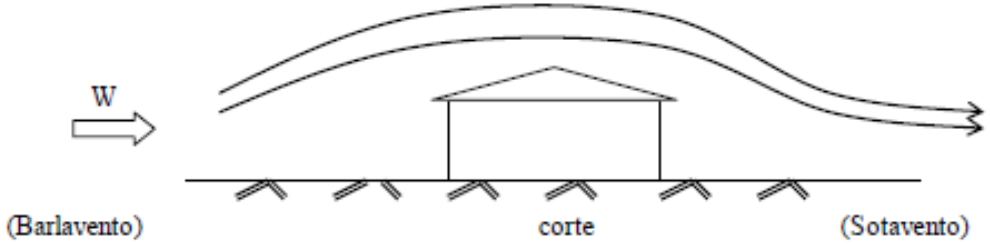


Nacelle Strake

➢ Ação do vento nas edificações (NBR6123)

Definições



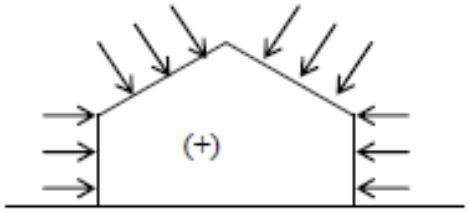


Barlavento: região de onde sopra o vento, em relação à edificação analisada

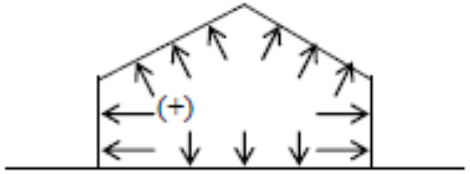
Sotavento: região para onde sopra o vento, em relação à edificação analisada

➢ Definições

Sobrepressão: Pressão efetiva acima da pressão atmosférica de referência (sinal positivo)

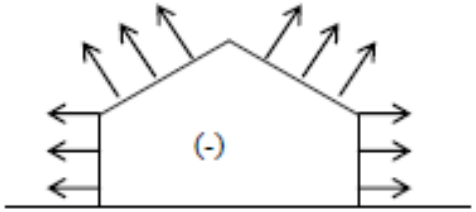


sobrepressão externa



sobrepressão interna

Sucção: Pressão efetiva abaixo da pressão atmosférica de referência (sinal negativo)



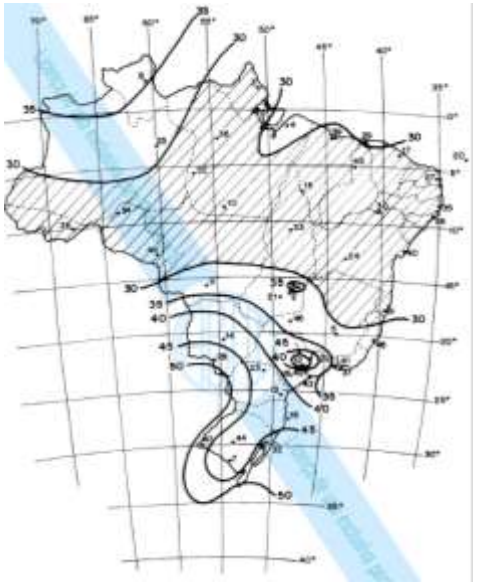
sucção externa



sucção interna

➢ Definições

V_o: velocidade básica do vento (m/s)



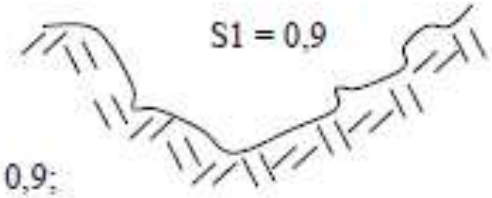
velocidade de uma rajada de 3 s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano

V_k: velocidade característica do vento (m/s)

$$V_k = S_1 . S_2 . S_3 . V_o$$

- **S_1: fator topográfico**
- **S_2: fator de rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno**
- **S_3: fator probabilístico**

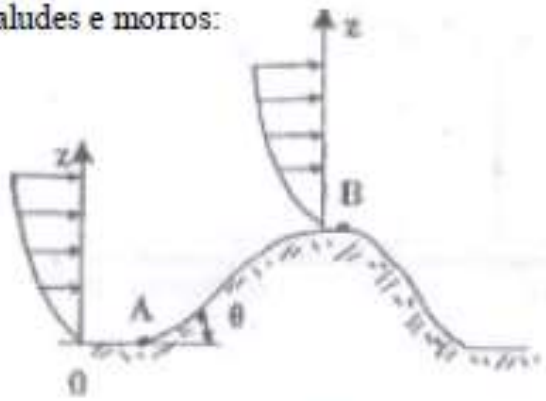
S_1 - Fator topográfico



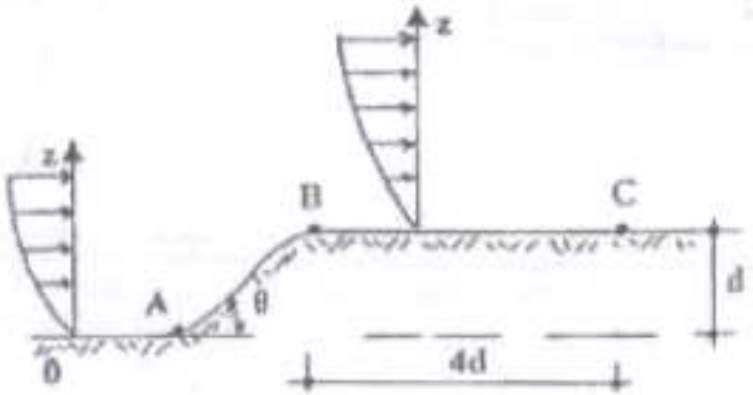
a) Terrenos planos: $S_1 = 1,0$;

b) Vales profundos protegidos dos ventos de qualquer direção: $S1 = 0,9$;

c) Taludes e morros:



Morro



Talude

Nos pontos A e C : $S_1 = 1,0$

No ponto B : $\theta \leq 3°$, $S_1 = 1,0$

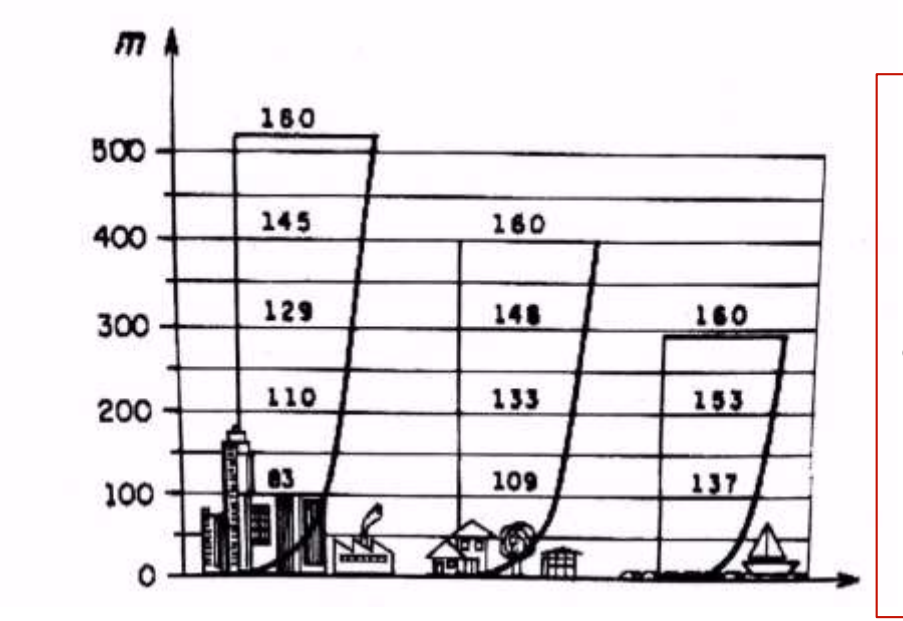
$3° < \theta < 6°$, S_1 - Interpolar linearmente

$6° \leq \theta \leq 17°$, $S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) tg\left(\theta - 3°\right) \geq 1,0$

$17° < \theta < 45°$, S_1 - Interpolar linearmente

$\theta \geq 45°$, $S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) 0,31 \geq 1,0$

S_2: fator de rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno



A rugosidade do terreno influencia diretamente a velocidade de escoamento do vento. Quanto maior a rugosidade (número e tamanho dos obstáculos), maior o abrandamento do perfil vertical de velocidade. Em terrenos planos o vento apresentará velocidade média superior se comparada à velocidade do vento em um centro urbano densamente ocupado

Rugosidade do Terreno:

Categoria I : superfícies lisas de água com mais de 5 km de extensão.
Categoria II : obstáculos com $h \leq 1{,}0$ m
Categoria III : obstáculos com $1{,}0\ m < h \leq 3{,}0$ m
Categoria IV : obstáculos com $3{,}0\ m < h \leq 10{,}0$ m
Categoria V : obstáculos com $h_{médio} \geq 25{,}0$ m

CATEGORIA I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão que é medida na direção e sentido do vento incidente. Como exemplos podem ser citados o mar calmo, lagos e rios, pântanos sem vegetação





CATEGORIA II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados como árvores e edificações baixas com cota média inferior ou igual a 1m. Ex: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias e charnecas, fazendas sem muros.





CATEGORIA III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, como sebes ou muros, quebra ventos de árvores, edificações esparsas e baixa, em que a cota média dos obstáculos seja de 3m.





CATEGORIA IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados cuja cota média é considerada igual a 10m, tais como cidades pequenas e seus arredores, zonas de parques e bosques com muitas árvores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades e áreas industriais.





CATEGORIA V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados tais como florestas com árvores altas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos





Classes de edifições.

Classe A:	Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m
Classe B:	Toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m.
Classe C:	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m.

Fonte: NBR6123/1988

Fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Ex: Categoria do terreno: III; Classe Edificação: C; Altura: 60m ⟹ **$S_2 = 1,09$**

Tabela 3 - Valores mínimos do fator estatístico S_3:

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação. (depósitos, silos, construções rurais, etc)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

(Tabela 3: transcrita da NBR 6123:88)

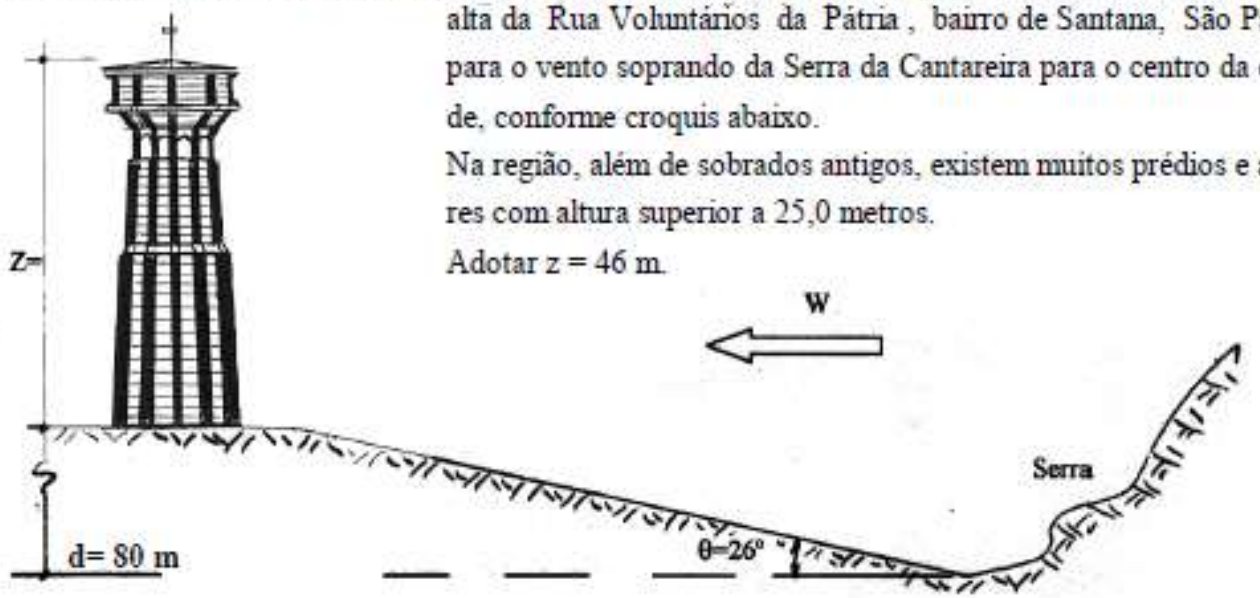
6.1. Exercícios resolvidos:

Assunto: Cálculo da pressão dinâmica do vento e determinação do fator topográfico em taludes.

Ex 1: Determinar a pressão dinâmica do vento no topo da caixa d'água da SABESP, localizada na parte alta da Rua Voluntários da Pátria, bairro de Santana, São Paulo, para o vento soprando da Serra da Cantareira para o centro da cidade, conforme croquis abaixo.

Na região, além de sobrados antigos, existem muitos prédios e árvores com altura superior a 25,0 metros.

Adotar z = 46 m.



(sem escala)

Solução: São Paulo – Capital: $V_0 = 40$ m/s

Fator S_1: edificação no alto de um talude com inclinação θ=26°. Portanto necessita interpolação.

$P/\theta = 17^0$, *vem*: $S_1 = 1 + \left(2{,}5 - \frac{46}{80}\right) tg(17^0 - 3^0) = 1{,}48$

$P/\theta = 45^0$, *vem*: $S_1 = 1 + \left(2{,}5 - \frac{46}{80}\right) 0{,}31 = 1{,}60$

θ	S_1
17^0	1,48
26^0	S_1
45^0	1,60

$$\frac{45^0 - 17^0}{26^0 - 17^0} = \frac{1{,}60 - 1{,}48}{S_1 - 1{,}48}$$

$28 S_1 - 41{,}44 = 1{,}08 \quad \therefore \quad S_1 = 1{,}52$

Fator S_2: 20m < 46m < 50m ∴ classe B

Vizinhança: obstáculos com altura média 25 m, ∴ categoria V

z=46 m, ∴ interpolar na tabela 2 da NBR 6123/88.

z (m)	S_2
40m	0,89
46	S_2
50	0,93

$$\frac{50 - 40}{46 - 40} = \frac{0{,}93 - 0{,}89}{S_2 - 0{,}89}$$

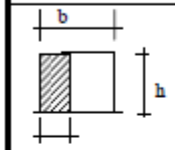
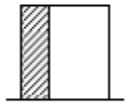
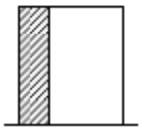
$1{,}667 S_2 - 1{,}483 = 0{,}04 \quad \therefore \quad S_2 = 0{,}91$

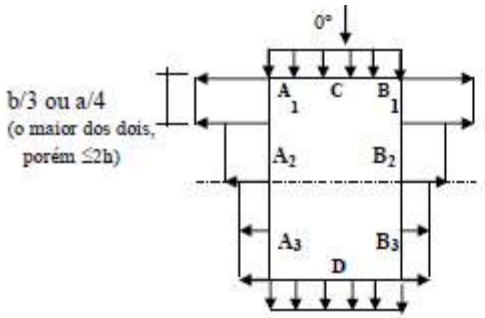
Fator S_3: Embora não conste, caixa d'água de bairro ou cidade tem a mesma importância que as edificações constantes no grupo 1 da tabela 3 da NBR 6123/88. ∴ $S_3 = 1{,}1$

Velocidade característica: $V_K = V_0 . S_1 . S_2 . S_3 = 40 \times 1{,}52 \times 0{,}91 \times 1{,}1 = 60{,}86$ m / s.

Pressão dinâmica do vento: $q = 0{,}613\ V_K^2 = 0{,}613 \cdot 60{,}86^2 = 2271$ N / m^2

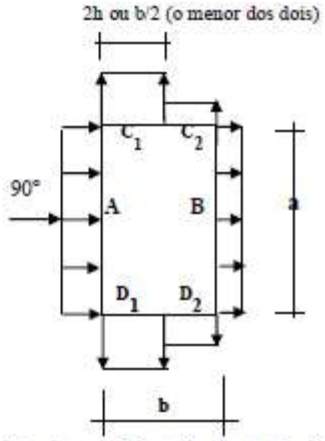
Tabela 4: Coeficientes de pressão e de forma externos, para paredes de planta retangular (Tabela 4 - transcrita da NBR 6123:88 com finalidade didatica)

Altura relativa		Valores de Ce para α = 0°				α = 90°				$C_{pe\ médio}$
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 0,2b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2



a) Para **a/b** entre 3/2 e 2 interpolar linearmente.
b) Para vento a 0°, nas partes A_3 e B_3, o coeficiente de forma **Ce** tem os seguintes valores:
- Para **a/b = 1** : mesmo valor das partes A_2 e B_2
- Para **a/b ≥ 2** : **Ce = - 0,2**
- Para **1<a/b<2** : interpolar linearmente

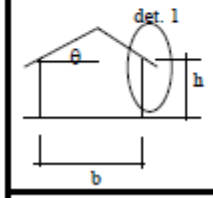
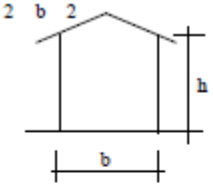
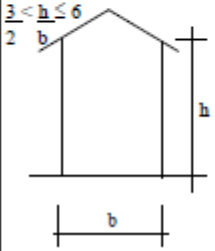
c) Para cada uma das incidências do vento (0° ou 90°), o coeficiente de pressão médio externo , **Cpe médio**, é aplicado à parte de barlavento das paredes paralelas ao vento, em uma distância igual a 0,2b ou h, considerando-se o menor destes dois valores



d) Para determinar o coeficiente de arrasto, **Ca**, deve ser usado o gráfico da Figura 4 (vento de baixa turbulência) ou da figura 5 (vento de alta turbulência – ver 6.5.3).

Telhados em duas águas :

Tabela 5: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular (Tabela 5 - transcrita da NBR 6123:88)

Altura relativa	θ	Valores de C_e para α=90° EF	α=90° GH	α=0° EG	α=0° FH	C_{pe} médio			
h/b ≤ 1/2 	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	-
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
1/2 < h/b ≤ 3/2 	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	-
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
3/2 < h/b ≤ 6/2 	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	-
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	45°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7				

Notas:

a) O coeficiente de forma Ce na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente;

b) Nas zonas em torno de partes da edificações salientes ao telhado (chaminés, reservatórios, torres, etc...), deve ser considerado um coeficiente de forma Ce=1,2, até uma distância igual a metade da dimensão da diagonal da saliência vista em planta;

c) Na cobertura de lanternins, Cpe médio = - 2,0. tem os seguintes valores:

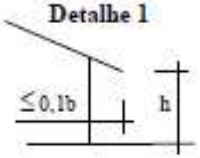
d) Para vento a 0°, nas partes I e J o coeficiente de forma Ce tem os seguintes valores:

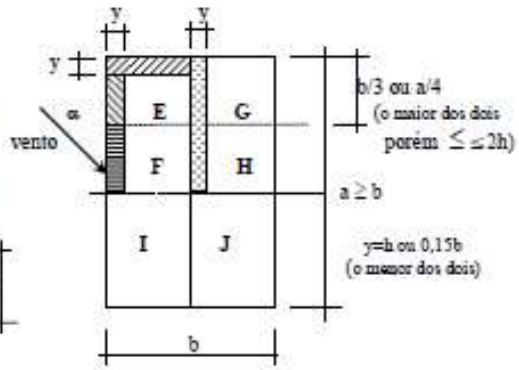
$\frac{a}{b} = 1$: mesmo valor das partes F e H;

$\frac{a}{b} \geq 2$: Ce = -0,2;

Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b.

Detalhe 1





➢ Coeficientes de Pressão Interna

NBR6123:

6.2 Coeficientes de pressão interna

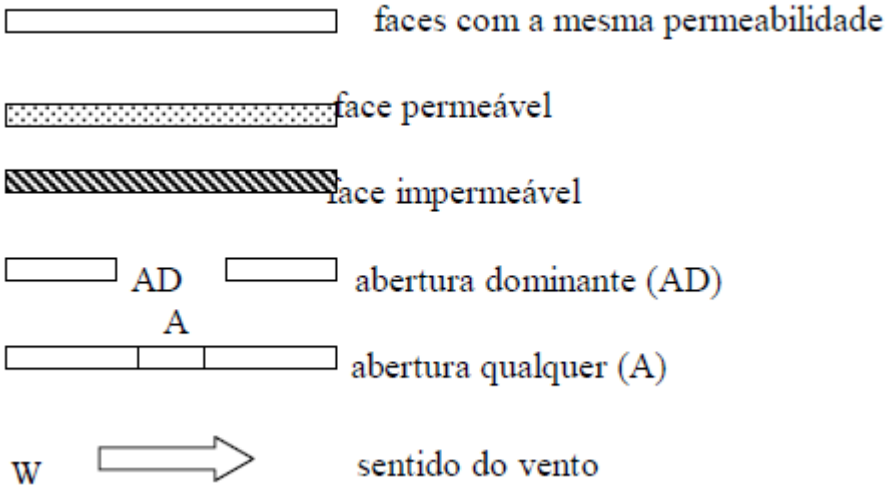
6.2.1 Se a edificação for totalmente impermeável ao ar, a pressão no seu interior será invariável no tempo e independente da velocidade da corrente de ar externa. Porém, usualmente as paredes e/ou a cobertura de edificações consideradas como fechadas, em condições normais de serviço ou como conseqüência de acidentes, permitem a passagem do ar, modificando-se as condições ideais supostas nos ensaios. Enquanto a permeabilidade não ultrapassar os limites indicados em 6.2.3, pode ser admitido que a pressão externa não é modificada pela permeabilidade, devendo a pressão interna ser calculada de acordo com as especificações dadas a seguir.

6.2.2 Para os fins desta Norma, são considerados impermeáveis os seguintes elementos construtivos e vedações: lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, de blocos de concreto e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas. Os demais elementos construtivos e vedações são considerados permeáveis. A permeabilidade deve-se à presença de aberturas, tais como juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhas e telhados, vãos abertos de portas e janelas, chaminés, lanternins, etc.

6.2.3 O índice de permeabilidade de uma parte da edificação é definido pela relação entre a área das aberturas e a área total desta parte. Este índice deve ser determinado com toda a precisão possível. Como indicação geral, o índice de permeabilidade típico de uma edificação para moradia ou escritório, com todas as janelas e portas fehadas, está compreendido entre 0,01% e 0,05%. Para aplicação dos itens de 6.2, excetuando-se o caso de abertura dominante, o índice de permeabilidade de nenhuma parede ou água de cobertura pode ultrapassar 30%. A determinação deste índice deve ser feita com prudência, tendo em vista que alterações na permeabilidade, durante a vida útil da edificação, podem conduzir a valores mais nocivos de carregamento.

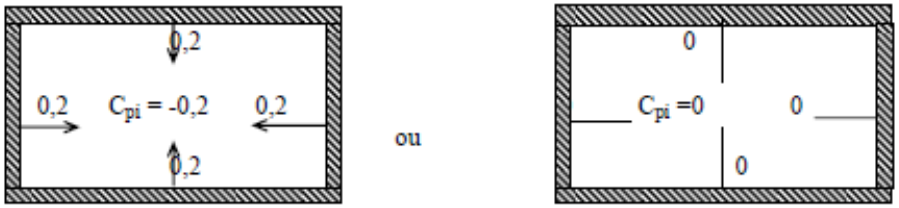
➢ Coeficientes de pressão e de forma internos

Convenções:



Caso 1: **edificações efetivamente estanques e com janelas fixas que tenham probabilidade desprezível de serem rompidas por acidente**

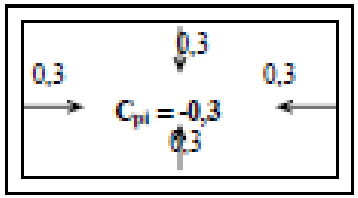
$C_{pi} = -0,2$ ou $C_{pi} = 0$, adotar o mais nocivo dos valores.

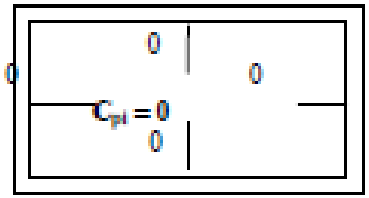


➢ Coeficientes de pressão e de forma internos

Caso 2: quatro faces igualmente permeáveis

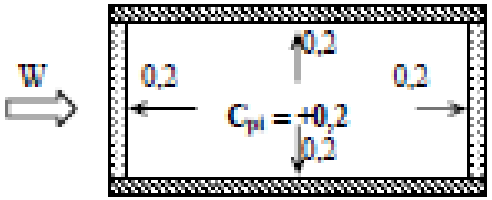
$C_{pi} = -0,3$ ou $C_{pi} = 0$, adotar o mais nocivo dos valores.



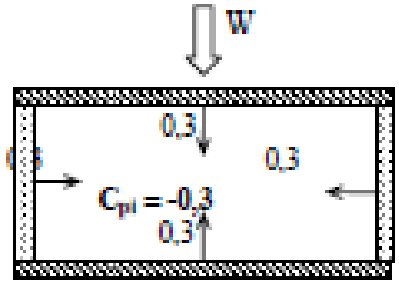


Caso 3: duas faces opostas igualmente permeáveis, as outras duas impermeáveis

a) Vento perpendicular a uma face permeável:
$C_{pi} = +0,2$



b) Vento perpendicular a uma face impermeável
$C_{pi} = -0,3$

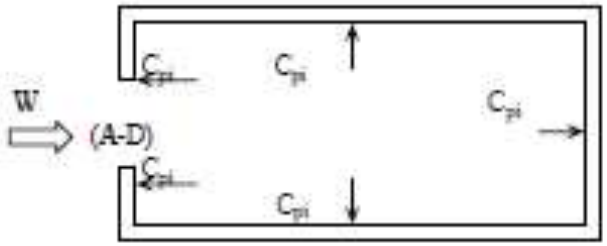


➢ Coeficientes de pressão e de forma internos

Caso 4: abertura dominante em uma face, as outras faces de igual permeabilidade

a) Abertura dominante na face de barlavento:

Neste caso, o valor do coeficiente C_{pi} é positivo (sobrepressão interna) e depende da relação de permeabilidade "R_i", definida por:

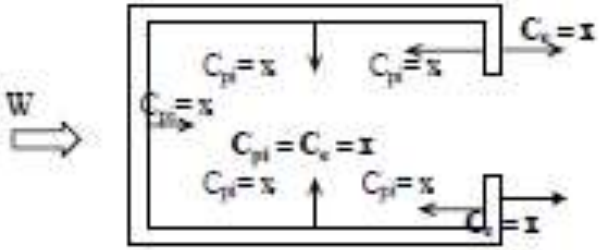


$$R_i = \frac{\sum \text{das áreas das aberturas dominantes e das áreas de todas as aberturas na face de barlavento}}{\sum \text{das áreas de todas as aberturas situadas nas faces submetidas a sucções externas (paredes ou cobertura)}}$$

R_i	C_{pi}
1,0	+0,1
1,5	+0,3
2,0	+0,5
3,0	+0,6
≥6	+0,8

b) Abertura dominante na face de sotavento:

- **adotar valor do coeficiente de forma externo (C_e) correspondente a esta face.**



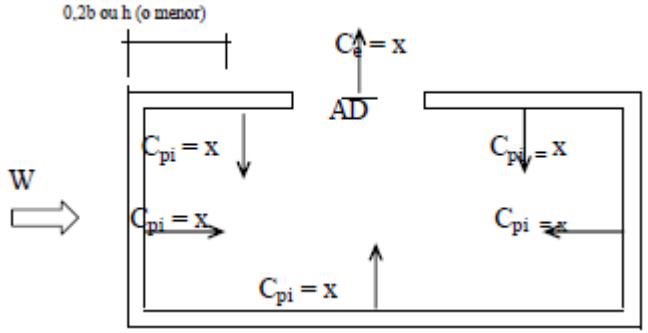
➢ Coeficientes de pressão e de forma internos

Caso 4: abertura dominante em uma face, as outras faces de igual permeabilidade

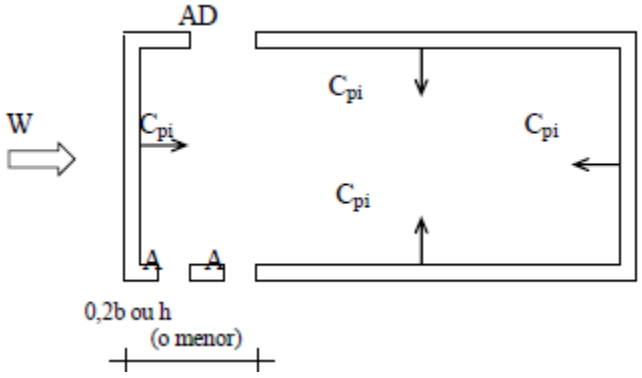
c) Abertura dominande em uma face paralela ao vento

i) Abertura dominande NÃO situada em zona de alta sucção externa

- Adotar valor do coef. de forma externo (Ce) correspondente ao local da abertura nesta face



ii) Abertura dominande situada em zona de alta sucção externa



C_{pi} depende da relação de permeabilidade R:

$$R_2 = \frac{\sum \text{ da(s) área(s) da(s) abertura(s) dominante(s) e das demais áreas situadas nesta zona}}{\sum \text{ das áreas das outras aberturas situadas em todas as faces submetidas a sucções externas}}$$

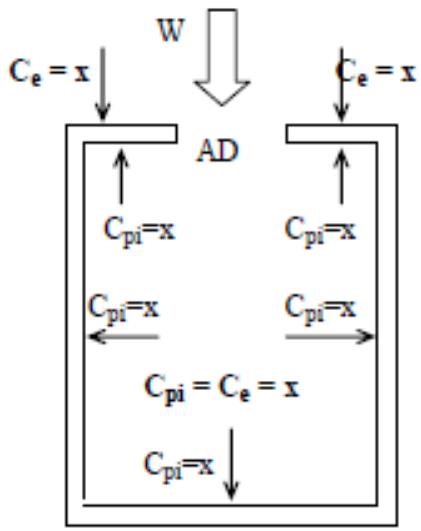
R_2	C_{pi}
0,25	-0,4
0,50	-0,5
0,75	-0,6
1,00	-0,7
1,50	-0,8
≥ 3,00	-0,9

➢ Coeficientes de pressão e de forma internos

Caso 4: abertura dominante em uma face, as outras faces de igual permeabilidade

SIMPLIFICAÇÃO: Quando não for considerado necessário ou quando não for possível determinar com exatidão razoável a relação de permeabilidade (R), deve ser adotado para o coeficiente de pressão interna, o mesmo valor do coeficiente de forma externo (Ce), para as incidências de vento de 0° e 90°, para a zona em que se situa a abertura dominante, tanto em paredes como em coberturas:

a) Para abertura dominante na face de barlavento:



b) Para abertura dominante situada em zona de alta sucção externa:

