



Ação do vento nas estruturas

Célio Fontão Carril Jr

Depto de Engenharia de Estruturas e Fundações, EPUSP,
15054-000, São Paulo, SP
E-mail: cfcarril@usp.br

Resumo: Este trabalho apresenta os conceitos básicos sobre o efeito do vento nas edificações contidos em diferentes bibliografias, com o objetivo de fornecer subsídios aos engenheiros para melhor avaliarem os esforços do vento na estrutura. Devido à interdisciplinaridade do assunto que envolve conceitos de probabilidade e estatística, de mecânica dos fluidos e da dinâmica estrutural, poucos engenheiros dominam esse conhecimento. Não se pretende esgotar o assunto, mas apenas fornecer as bases para um melhor entendimento. Apresentam-se noções sobre a camada limite atmosférica onde se encontram as edificações, noções sobre mecânica dos fluidos e alguns procedimentos contidos na Norma Brasileira NBR6123 – Forças devidas ao vento nas edificações [1]. Um exemplo da determinação dos coeficientes aerodinâmicos em um galpão industrial é apresentado no final.

Palavras-chave: efeito do vento, estruturas, coeficiente de pressão, aerodinâmica das construções.

1. Introdução

O efeito do vento nas edificações tem sido muito estudado nos últimos 30 a 35 anos em diversos países como mostram as publicações em diferentes revistas e conferências internacionais. No entanto, apesar dessas publicações, o bom entendimento do efeito dinâmico do vento entre os engenheiros projetistas deixa muito a desejar. Isto ocorre provavelmente devido à interdisciplinaridade do assunto que envolve conceitos da probabilidade e estatística, da mecânica dos fluidos de corpos rombudos e da dinâmica estrutural. Os engenheiros normalmente estão acostumados a projetar estruturas sob efeito de cargas estáticas nominais.

A determinação das forças devidas ao vento em edificações é feita utilizando as normas vigentes nos diferentes países onde a edificação será construída. As normas permitem, no entanto, que ensaios em túneis de vento de camada limite atmosférica sejam realizados, substituindo os coeficientes aerodinâmicos fornecidos pelas mesmas.

Devido à complexidade desses coeficientes e dos fenômenos envolvidos, muitos engenheiros tem tido dificuldades para determinação do efeito causado pelo

vento na edificação projetada. O conhecimento mais profundo dos fenômenos envolvidos é necessário para tomar decisões de projeto visando à segurança e a economia das edificações. Muitas vezes, uma edificação pode ter uma particularidade não contemplada pelas normas e apenas resta o recurso de ensaios em túneis de vento, prescrito nas próprias normas.

Até pouco tempo havia no Brasil apenas um túnel de camada limite de grande proporção: o TV2 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em operação desde 1977, de circuito fechado possui 21,38 m com câmara de ensaio de 8,32 metros de comprimento e relação comprimento/altura maior que 10. Em 2002 foi inaugurado o maior túnel de vento de camada limite do Brasil no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, no Centro de Metrologia. Este túnel, de circuito aberto, possui 40 metros de comprimento sendo a câmara de ensaio de 3 metros de largura por 2,0 metros de altura e 28 metros de comprimento, capaz de realizar ensaios com modelos em escalas maiores que o túnel TV2.

Atualmente as edificações estão mais esbeltas e problemas dinâmicos causados pelo vento são significativos e muitas vezes, por desconhecimento, os projetistas deixam de fazer verificações importantes que podem causar desconforto aos usuários ou até mesmo o colapso da estrutura. Um exemplo clássico destes problemas ocorreu com a ponte Tacoma Narrows, nos Estados Unidos que culminou com a ruína do tabuleiro, fato este filmado por cineasta amador na década de 40.

O objetivo deste trabalho é estabelecer os conceitos básicos sobre o assunto, distribuídos em diferentes bibliografias, fornecendo subsídios aos engenheiros projetistas para melhor determinarem a ação dinâmica do vento nas edificações utilizando a norma Brasileira NBR6123, 1988 [1], e ainda melhor decidirem sobre a necessidade de ensaios específicos em túneis de vento como a própria norma especifica.

2. O Vento

O vento, movimento do ar sobre a superfície terrestre, é causado por diferenças na pressão

atmosférica, devido às energias provenientes do sol que origina variações de temperatura do ar. As pressões desequilibradas originam forças que deslocam as massas de ar das zonas de alta pressão para as de menor pressão. Outros fatores também influenciam esses deslocamentos de ar como a rotação da terra, evaporação, precipitação da água e a topografia.

Quando duas massas de ar com temperaturas diferentes se colidem, não se misturam, formando uma superfície frontal separadora. A intersecção desta superfície com a superfície terrestre constitui uma frente. Em geral em uma frente uma das massas de ar está em movimento e a frente leva o nome da massa que se desloca. Assim em uma frente fria a massa que se desloca é a fria e em uma frente quente a massa que se desloca é a quente. A frente fria avança a uma velocidade variável, sendo 8m/s (30 km/h) uma velocidade representativa. São mais rápidas no inverno que no verão. O avanço da frente quente é mais lento, em torno de 7m/s (25 km/h) ou menos. A figura 2.1 mostra a superfície frontal das frentes.

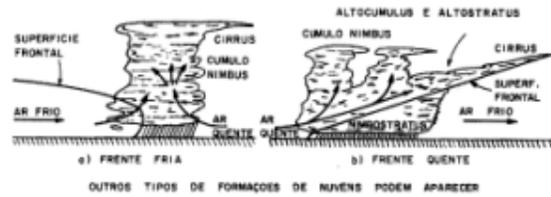


Figura 2.1 – Frentes frias e quentes [2]

As frentes frias causam instabilidades associadas a chuvas intensas e ventos fortes. Já as frentes quentes em geral não provocam condições violentas de tempo.

Existem vários tipos de ventos fortes, podendo citar os ciclones tropicais (furacões) e extratropicais (causados por frentes frias polares em latitudes temperadas), tormentas elétricas e tornados.

Caso se deseje estimar a velocidade do vento a tabela 2.1 apresenta a Escala Belfort que classifica o vento de acordo com o efeito produzido. Essa tabela refere-se a terreno de categoria II da norma brasileira sendo dez minutos o intervalo de tempo usado para o cálculo da velocidade média, a dez metros acima do terreno.

Grau	Velocidade do vento		Descrição do vento	
	\bar{V} (10min) (Km/h)	(m/s)	Efeitos devidos ao vento	
0	<1	< 1,5	Calmaria	A fumaça eleva-se verticalmente
1	1-6	0,3 –1,6	Aragem	A fumaça inclina-se, indicando direção e sentido do vento.
2	6-12	1,6-3,3	Brisa	Sente-se o vento nas faces. Folhas agitam-se suavemente.
3	12-20	3,3-5,4	Vento suave	Movem-se as folhas das árvores.
4	20-29	5,4-8,0	Vento moderado	Movem-se pequenos ramos. O vento estende as bandeiras. O cabelo é completamente despenteado.
5	29-39	8,0-10,7	Vento regular	Movem-se os ramos maiores.
6	39-50	10,7-13,8	Vento forte	Galhos e arbustos grandes em movimento.
7	50-62	13,8-17,1	Ventania fraca	Flexionam-se galhos fortes. Danos a coberturas mal construídas. O vento é ouvido em edifícios.
8	62-75	17,1-20,7	Ventania moderada	Difícil caminhar. Galhos finos quebram-se. Troncos das árvores esbeltas oscilam.
9	75-88	20,7-24,5	Ventania forte	Objetos leves são deslocados, quebram-se arbustos e galhos grossos, avarias em chaminés.
10	88-102	24,5-28,4	Vendaval	Arvores são arrancadas em grande número. Danos a plantações. Postes tombados.
11	102-120	28,4-33,3	Tempestade	Danos generalizados e severos
12	>120	>33,3	Furacão/tufão	Extremamente severo e devastador com danos ainda mais importantes que o causado por tempestades.

Tabela 2.1: Escala Beaufort [3]

3. Perfil vertical da velocidade média do vento

As características do vento aqui apresentadas aplicam-se a ventos fortes oriundos de ciclones extratropicais, por terem uma atmosfera verticalmente estável e uma velocidade média razoavelmente constante por até algumas dezenas de horas. Admite-se também, com aproximação aceitável, a aplicação dessas características em ventos oriundos de ciclones tropicais.

A velocidade do vento em uma região depende do tipo de terreno, da topografia e da altura sobre o terreno. Na camada limite atmosférica, a velocidade é nula no solo e aumenta com a altura sobre o terreno até atingir um valor constante chamado de velocidade gradiente (V_G) na altura gradiente (z_G). Essa altura corresponde à altura da camada limite atmosférica, onde as edificações se encontram. Conforme o tipo de terreno a NBR6123 [1] considera alturas de camada limite atmosférica variando de 250 a 500 metros.

Existem dois tipos de formulação para determinar a velocidade média do vento (V) em função da altura acima do nível do terreno (z): lei logarítmica e lei potencial. A lei logarítmica, embora cientificamente mais correta, não será utilizada neste trabalho, no entanto é muito utilizada para ensaios em túneis de vento. Maiores detalhes sobre a lei logarítmica podem ser vistos em [2]. A lei potencial, por ser de mais fácil tratamento e ter uma boa concordância com os dados experimentais, é amplamente utilizada na engenharia civil. A expressão genérica dessa lei, válida dentro da camada limite atmosférica, é a seguinte:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad 3.1$$

que relacionam as velocidades médias em duas alturas quaisquer dentro da camada limite atmosférica, z e z_{ref} . A altura de referência, na prática pode ser a altura gradiente ou a altura de 10m. O valor de p depende do tipo de terreno. A figura 3.1 mostra a camada limite atmosférica.

3.1 Intervalo de tempo

O vento é caracterizado por uma velocidade média e suas flutuações. As flutuações do escoamento do ar são quase que integralmente causadas por agitação

mecânica do ar, formando um grande número de turbilhões, também denominados de redemoinhos.

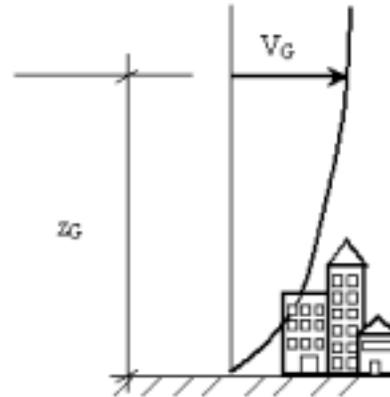


Figura 3.1 – Perfil de velocidade média

Os turbilhões originam as rajadas de vento que ocorrem em uma seqüência aleatória de frequências e intensidades. As rajadas mais fortes são de pequena duração e atuam sobre uma pequena região da edificação correspondendo a chegada de pequenos turbilhões em determinada região ao mesmo tempo de modo tal, que seus efeitos se somam. Os turbilhões de grandes dimensões (dezenas ou centenas de quilômetros), causados por transformações termodinâmicas, causam, sob o ponto de vista da engenharia estrutural, variação lenta na direção e velocidade do vento médio.

A duração da rajada deve ser suficientemente grande para abranger todo o campo aerodinâmico da construção. Quanto mais veloz uma rajada, menor seu tempo de atuação e menores as dimensões do turbilhão correspondente. Rajadas de poucos segundos são suficientes para causar pressões plenamente desenvolvidas em pequenas edificações ou em elementos da estrutura secundária e do revestimento de paredes e coberturas. Uma rajada de maior duração é necessária para a pressão correspondente abranger toda edificação.

Para definir a velocidade deve-se considerar turbilhões que envolvem plenamente a edificação. O tamanho dos turbilhões é caracterizado pelas correspondentes escalas espaciais. Cada uma delas é definida pelo comprimento L de um retângulo de mesma área A sob a curva de correlação espacial R (fig. 3.2) da respectiva componente do vetor velocidade.

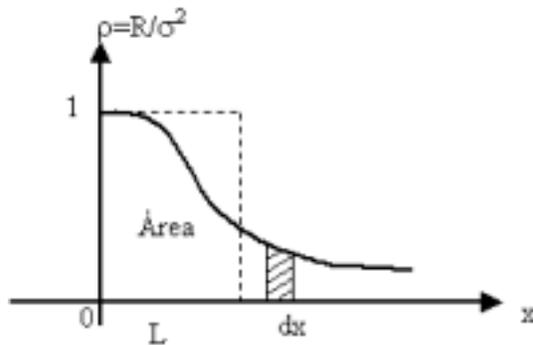


Fig. 3.2 - Correlação longitudinal da turbulência

onde

$$A = \int_0^{\infty} e^{-Cfx/\bar{V}_t} dx = \bar{V}_t t / C \quad 3.2$$

f – frequência das flutuações

x - distância horizontal ou vertical entre dois pontos em estudo

\bar{V}_t - é a velocidade média de deslocamento do turbilhão.

A escala espacial é dada por

$$L = \bar{V}_t t / C \quad 3.3$$

onde

L é a altura ou largura da edificação;

\bar{V}_t é a velocidade média sobre t segundos no topo da edificação;

C é um valor empírico adotado pela NBR6123 [1] como 7,5.

Portanto

$$t = 7,5L / \bar{V}_t(h) \quad 3.4$$

Com base nessa fórmula a Norma NBR6123 [1] adotou classes de edificação onde:

- maior dimensão abaixo de 20 m – t= 3s
- maior dimensão entre 20 e 50m – t=5s
- maior dimensão acima de 50m – t=10s

Para determinar a ação do vento em uma edificação o engenheiro deve saber especificar a camada limite atmosférica no local onde a edificação será construída. Para isso a Norma Brasileira NBR6123 [1] fornece todos os parâmetros

necessários ao cálculo. Além de especificar a camada limite atmosférica o engenheiro deve ter em mãos os coeficientes aerodinâmicos que dependem da geometria da edificação. Esses coeficientes são obtidos com ensaios em túneis de vento. No entanto fica evidente que as normas existentes não tem condições de fornecer esses coeficientes para todos os tipos de edificação. Assim o engenheiro deverá recorrer a bibliografia especializada e a ensaios em túneis de vento. Além disso, há casos de estruturas esbeltas cuja ação dinâmica é muito importante (torres esbeltas, pontes pênsis). Nestes casos, estudos especiais devem ser feitos.

A seguir são apresentados alguns parâmetros de projeto contidos na NBR6123 e alguns fundamentos teóricos importantes para a compreensão desses parâmetros.

4. Velocidade do vento

A velocidade máxima do vento a ser utilizada em projeto depende de medições na região onde a edificação será construída durante um longo intervalo de tempo. Um estudo estatístico pode então ser realizado para determinar, com um certo grau de confiabilidade essa velocidade. As medições são feitas usualmente com anemômetros de copo em aeroportos onde a superfície é plana sem interferências de construções. As medidas devem ser realizadas a 10 metros de altura com leituras de velocidade média sobre três segundos

4.1 Velocidade básica do vento

A Norma brasileira NB6123 define a velocidade básica do vento, V_0 , como a velocidade de uma rajada de três segundos, excedida, com uma probabilidade de 63%, uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano. Com os dados das estações meteorológicas foi gerado um gráfico com curvas de igual velocidade do vento (isopletas) para todo o País. A figura 4.1 mostra essas curvas para todo o país e a figura 4.2 mostra as mesmas curvas ampliadas para São Paulo.

A grande área hachurada no mapa se deve à falta de dados confiáveis e ao pequeno tempo de aquisição de dados em muitas estações da região. Entende-se que a velocidade básica nessa região, a favor da segurança deve ser de 30 m/s. No entanto, atualmente mais dados meteorológicos estão disponíveis e esse gráfico deveria ser atualizado.

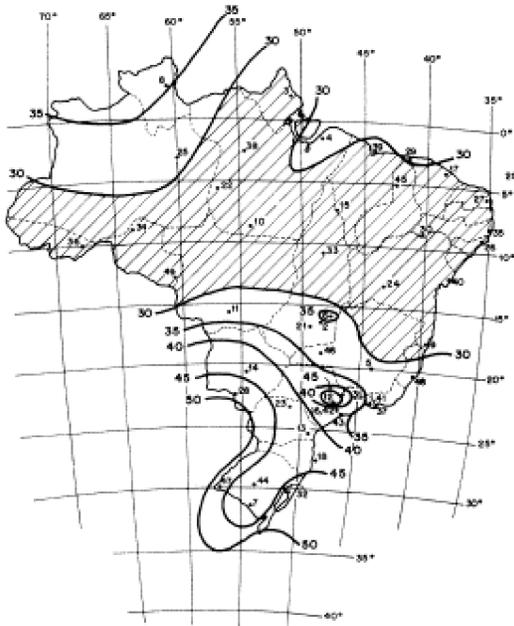


Figura 4.1 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s)
 V_0 : máxima velocidade média sobre 3s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano. [1]



Figura 4.2 Isopletas da velocidade básica do vento para o estado de São Paulo [4]

Admite-se que o vento básico pode ocorrer em qualquer direção horizontal. No caso de dúvida quanto à seleção da velocidade básica ou em caso de obras especiais de grande importância, a norma brasileira permite que sejam feitos estudos especiais para determinação de V_0 , inclusive com direções preferenciais.

4.2 Velocidade característica do vento

A velocidade usada para determinar as pressões do vento na edificação depende da topografia do local, da rugosidade do terreno, altura e dimensões em planta da edificação, condições de vida útil, importância da edificação e conseqüências que sua ruína possa causar ao meio ambiente. É necessário determinar a velocidade característica, que de acordo com [1], é dada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad 4.1$$

onde V_0 é a velocidade básica do vento, S_1 é o fator topográfico; S_2 depende da rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno; e S_3 é o fator estatístico.

Fator S_1

O fator S_1 é o fator topográfico que considera as variações de relevo do terreno em volta da edificação podendo haver acréscimo ou diminuição da velocidade básica do vento, figura 4.3.

Um talude ou morro de altura d causa um aumento na velocidade do vento devido a um efeito venturi. O efeito será máximo para o vento soprando perpendicularmente à linha do cume e também para um talude ou morro de grande largura, de modo que o escoamento possa ser considerado bidimensional. Para inclinações até 17° o aumento da velocidade causada por esse efeito venturi aumenta com a inclinação. Para inclinações maiores as velocidades permanecem constantes, independente da inclinação. Isto porque se forma um vórtice na base do morro ou talude que mantém inalteradas as linhas de corrente que se formam com inclinação de 17° .

Três situações são consideradas:

- Terreno plano ou fracamente acidentado - $S_1 = 1$
- Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção - $S_1 = 0,9$
- Taludes e morros alongados nos quais pode ser admitido um escoamento de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura 4.3. O valor S_1 é função da declividade, conforme a posição relativa da edificação:

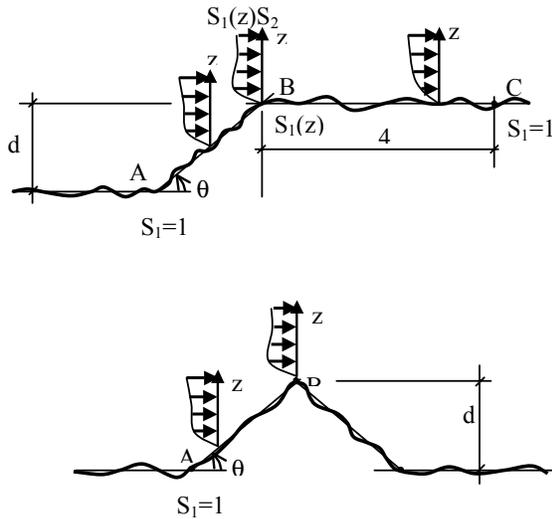


Figura 4.3 - Fator topográfico $S_1(z)$

Nos pontos A e C (taludes) e no ponto A (morros) - $S_1 = 1$

No ponto B - S_1 é função da altura z acima do terreno dado por:

$$\theta = 3^\circ: S_1 = 1$$

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

$$\theta \geq 45^\circ: S_1 = 1,0 + (2,5 - \frac{z}{d})0,31 \geq 1$$

onde:

z é a altura do ponto na edificação onde se aplica a pressão do vento.

d é a diferença de nível entre a base e o topo do talude

θ é a inclinação média do talude ou encosta do morro

Pode-se interpolar linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ$ e $17^\circ < \theta < 45^\circ$.

Para se ter uma idéia da ordem de grandeza, seguem alguns valores de S_1 para alguns valores de d e θ :

$$\text{Para } z \geq 2,5d \text{ e qualquer } \theta - S_1 = 1$$

$$\text{Para } z=0,5d \text{ e } \theta=6^\circ - S_1 = 1,11$$

$$\text{Para } z=0,5d \text{ e } \theta=17^\circ - S_1 = 1,50$$

$$\text{Para } z=0,5d \text{ e } \theta=45^\circ - S_1 = 1,62$$

O fator topográfico S_1 leva em consideração o aumento da velocidade do vento na presença de morros e taludes, mas não considera a alteração na

turbulência com o aumento da velocidade do vento. A turbulência é importante para a determinação da resposta dinâmica de estruturas esbeltas, como o caso de algumas torres de telecomunicações. São necessários novos estudos experimentais e numéricos para determinar essa diminuição da intensidade de turbulência causada pela presença de aclives.

Fator S_2

O fator S_2 leva em consideração o efeito combinado da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno, dado pelo perfil de velocidade do vento na atmosfera que depende da rugosidade do terreno, e o tamanho da edificação ou parte dela, considerado no intervalo de tempo como visto anteriormente.

A NBR6123 classifica a rugosidade do terreno em 5 categorias:

Categoria I - Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e sentido incidente (mar calmo, lagos e rios, pântanos sem vegetação), figura 4.4.

Categoria II - Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas (zonas costeiras, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias, fazendas sem sebes ou muros). A cota média do topo dos obstáculos é menor ou igual a 1; figura 4.5.

Categoria III - Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas (granjas e casas de campo, com exceção das partes com matas, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a grande distância do centro). A cota média do topo dos obstáculos é igual a 3,0 m, figura 4.6.

Categoria IV - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados em zonas florestais, industriais ou urbanizados (zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas). A cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 m. Inclui também zonas com obstáculos maiores que ainda não podem ser considerados na Categoria V, figura 4.7.

Categoria V - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (florestas com árvores altas de copas isoladas,

centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos). A cota média do topo dos obstáculos é igual ou superior a 25 m, figura 4.8.



Figura 4.4 - Rugosidade Categoria I da NBR6123 [5]



Figura 4.5 - Rugosidade Categoria II – cota média dos obstáculos é menor ou igual a 1m. [5]



Figura 4.6 - Rugosidade Categoria III – cota média dos obstáculos igual a 3m. [5]



Figura 4.7 – Rugosidade Categoria IV – cota média dos obstáculos igual a 10m. [5]



Figura 4.8 – Rugosidade Categoria V – cota média dos obstáculos é igual ou maior que 25m [5]

Se houver mudança na rugosidade média do terreno, o perfil de velocidades vai se adaptando até formar uma nova camada limite atmosférica em equilíbrio com as novas condições de rugosidade. As equações que permitem determinar o perfil de velocidades intermediário que atuará em edificações podem ser vistas em [1]

O fator S_2 também considera a duração da rajada (intervalo de tempo visto no item 3.1) para que o vento englobe toda a estrutura. Nesse caso a norma brasileira fornece três tipos de edificações:

Classe A - Edificação cuja maior dimensão horizontal ou vertical seja menor que 20 metros. Peças individuais de estruturas sem vedação. Unidades de vedação. (duração da rajada de 3 segundos).

Classe B - Edificação ou parte dela cuja maior dimensão horizontal ou vertical esteja entre 20 e 50 metros (duração da rajada de 5 segundos).

Classe C - Edificação ou parte da edificação cuja maior dimensão horizontal ou vertical exceda 50 metros (rajadas de 10 segundos).

Quando a edificação, cuja maior dimensão horizontal ou vertical exceda 80 metros, a NBR6123 permite considerar um intervalo de tempo maior e, portanto diminuir a velocidade básica. Para determinação do intervalo de tempo t utiliza-se a equação 3.3.

O fator S_2 é usado para determinar a velocidade do vento a uma altura z acima do terreno e é dado por:

$$S_2 = b \cdot F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad 4.2$$

em que:

z – altura acima do nível médio do terreno

F_r – fator de rajada, correspondente à categoria II, classe A;

b – parâmetro da categoria do terreno

p – função da rugosidade do terreno e intervalo de tempo.

Os parâmetros usados para determinação de S_2 são apresentados na tabela 2.

Para a análise de uma estrutura, sua altura pode ser dividida usando-se o fator S_2 para determinação da velocidade característica que atua em cada parte. No caso de edificações altas pode ser usada a cota média de cada parte considerada. No caso de vedação, a norma recomenda usar o fator S_2

referente ao topo da edificação. Isto se deve ao fato de que na fachada de barlavento e nas fachadas laterais o vento é defletido para baixo, aumentando a pressão dinâmica na parte inferior da edificação.

No caso de edificações baixas utiliza-se o fator S_2 correspondente ao topo da edificação. Cabe observar que no caso de resultados de ensaios em túneis de vento em edifícios altos, geralmente os coeficientes de pressão são obtidos usando-se a velocidade de referência relativa à altura do topo da edificação e, portanto, para obter as pressões do vento ao longo da altura da edificação, o S_2 também deverá ser referente à cota do topo da edificação. No caso de edificações altas onde os coeficientes aerodinâmicos são fornecidos pela norma NBR6123 [1], o fator S_2 é referente à cota da superfície da edificação onde se deseja obter as pressões do vento.

Categ.	z_g (m)	Param.	Classes		
			A	B	C
I	25	b	1,10	1,11	1,12
	0	p	0,06	0,065	0,07
II	30	b	1,00	1,00	1,00
	0	F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	35	b	0,94	0,94	0,93
	0	p	0,10	0,105	0,115
IV	42	b	0,86	0,85	0,84
	0	p	0,12	0,125	0,135
V	50	b	0,74	0,73	0,71
	0	p	0,15	0,16	0,175

Tabela 2 - Parâmetros meteorológicos

Fator S_3

O fator estatístico S_3 considera o grau de segurança requerido e a vida útil da estrutura. Para edificações normais destinadas à moradia, hotéis, escritórios, etc., o nível de probabilidade de 63% de que a velocidade V_0 seja ultrapassada com uma vida útil de 50 anos são considerados adequados. A norma NBR6123 [1] recomenda valores mínimos do fator S_3 reproduzidos na tabela 3.

Para outros níveis de probabilidade e para outro período de recorrência (outra vida útil da edificação), a determinação pode ser feita por:

$$S_3 = 0,54 \left[- \frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad 4.3$$

em que

m – período de recorrência (vida útil)

P_m – probabilidade que a velocidade do vento seja ultrapassada pelo menos uma vez na vida útil

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína parcial ou total pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com baixo 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 - Valores mínimos de S_3

5. Noções de aerodinâmica

Para o bom entendimento dos efeitos do vento em edificações é necessária uma fundamentação teórica básica, que será apresentado de forma resumida.

O vento pode ser considerado um fluido incompressível até para velocidades de 100m/s, o que abrange todos os casos considerados na engenharia civil.

5.1 Teorema de conservação de massa

Um fluido em movimento deve satisfazer a equação de continuidade: a massa de fluido que entra em um certo volume em um determinado tempo é igual à massa que sai mais a variação da massa contida no volume. Quando em cada ponto de um certo espaço, as características do fluido não dependerem do tempo, o fluxo é dito permanente, ou seja, todas as partículas possuem velocidades iguais em um dado ponto e descrevem a mesma trajetória conhecida como linha de fluxo.

Seja o tubo de corrente da figura 5.1 onde A é a área de superfície plana, v é a velocidade média do fluido e ρ é a massa específica do fluido.

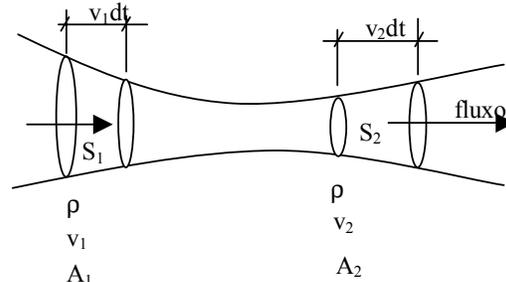


Figura 5.1 - Tubo de corrente de um fluido

Em regime permanente, considerando-se o volume limitado pelo tubo de corrente e pelas seções S_1 e S_2 , em um intervalo de tempo dt , tem-se:

massa do fluido que entra = $\rho.(A_1.v_1.dt)$

massa do fluido que sai = $\rho.(A_2.v_2.dt)$

em regime: $\rho.(A_1.v_1.dt) = \rho.(A_2.v_2.dt)$

para fluido incompressível $\rho = \rho_1 = \rho_2$ e assim tem-se:

$$A_1.v_1 = A_2.v_2 \quad 5.1$$

Daí conclui-se que se a área diminui a velocidade aumenta e vice-versa. É o que ocorre no efeito venturi quando as linhas de fluxo se aproximam e a velocidade do fluido aumenta.

5.2 Teorema de Bernoulli

Também conhecido como teorema de conservação de energia. Para escoamento incompressível, regime permanente, irrotacional e sem viscosidade, o Teorema de Bernoulli tem a seguinte expressão:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho z g = \text{constante} \quad 5.2$$

ρ – massa específica do fluido

p – a pressão estática

g – aceleração da gravidade

z – cota

No caso de gases em geral, as forças de massa são desprezíveis e, portanto:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{constante} \quad 5.3$$

ou seja, pressão dinâmica mais pressão estática é igual a pressão total.

5.3 Pressão estática

A pressão estática é definida por

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad 5.4$$

onde ΔF é a força exercida normalmente à superfície de área ΔA

A pressão estática é definida considerando o fluido em repouso, sendo medidos por manômetros metálicos ou a líquido, transdutores elétricos de pressão de vários tipos, etc.

A medida da pressão estática em um fluxo é problemática, pois o aparelho mergulhado no fluido produz alteração no escoamento. Quando se conhece a direção do fluxo nos túneis de vento, por exemplo, emprega-se os tubos de Prandtl.

Nos modelos de edificações em túneis de vento, medições da pressão estática ao longo de sua superfície são necessárias. Para isso são feitas tomadas de pressão através de orifícios em sua superfície. Esses orifícios são ligados por tubulações ao aparelho medidor, geralmente transdutores elétricos de pressão ou manômetros múltiplos a líquido. A medida da pressão estática do fluxo em túnel de vento é feita com um orifício ou uma série de orifícios (anel piezométrico) na parede do túnel ligados a um aparelho medidor de pressão.

5.4 Pressão Total

A pressão total pode ser medida utilizando o conceito de ponto de estagnação. Considerando um corpo mergulhado em um fluido em movimento permanente, uma ou mais linhas de corrente poderão incidir normalmente à sua superfície. No ponto onde isso ocorre a velocidade se anula, o fluido estagna. São os chamados pontos de estagnação onde toda pressão dinâmica foi transformada em pressão estática. A medida da pressão total pode ser feita fazendo um orifício no ponto de estagnação ligado a um manômetro.

Da equação de Bernoulli tem-se:

$$\frac{1}{2} \rho v_0^2 + p_0 = \frac{1}{2} \rho v_e^2 + p_e \quad 5.5$$

Como v_e é nulo no ponto de estagnação, tem-se:

$$\frac{1}{2} \rho v_0^2 + p_0 = p_e = p_t \quad 5.6$$

Desta forma a leitura da pressão estática nos fornece a pressão total. Ela pode ser obtida com um simples tubo de pequeno diâmetro, 0,5 a 0,3mm, retilíneo ou encurvado em ângulo reto, se necessário. É o chamado tubo de Pitot, figura 5.2.

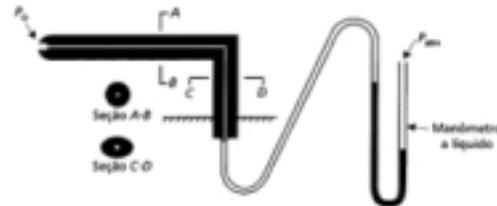


Figura 5.2 - Tubo de Pitot – medida de pressão total [4]

Da equação 5.7, a diferença entre as pressões estáticas é conhecida como pressão de obstrução. É a pressão efetiva em um ponto de estagnação do fluido. A equação 5.8 mostra que a pressão de obstrução é numericamente igual à pressão dinâmica do fluxo ao longe, q , em local não perturbado pelo obstáculo.

$$p_e - p_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 = q \quad 5.7$$

Essa pressão pode ser medida diretamente pelo sonda de Pitot-Prandtl que possui em uma mesma haste duas tomadas de pressão, uma estática e outra total.

A pressão dinâmica do vento é dada por

$$q = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad 5.8$$

Para determinar a massa específica do ar a NBR6123 usa as condições normais de pressão e temperatura (760mm de mercúrio e 15°C)

$$\rho = \frac{\text{peso_ar_unid_vol.}}{\text{aceleração_gravid.}} = \frac{1,2253 \text{kgf/m}^3}{9,80665 \text{m/s}^2} = 0,125 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

Substituindo o valor de ρ em 16 e mudando para unidades do sistema internacional:

$$q = 0,613 \cdot V^2 \quad 5.9$$

sendo: q em N/m² e V em m/s

6. Efeitos do vento nas edificações

A ação do vento é dinâmica, pois a velocidade varia com o tempo. Pode-se dividir a velocidade do vento, por questões práticas, em uma parte constante e uma parte flutuante, que são as rajadas. A NBR6123 [1] recomenda que para edificações com período fundamental de vibração igual ou inferior a 1s, a influência da parte flutuante é pequena, sendo seus efeitos considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S₂. Nesses casos podemos considerar a estrutura como estática, o que engloba a maioria das edificações. Quando a estrutura é muito esbelta e o período fundamental é superior a 1s a resposta dinâmica da estrutura devido à turbulência do vento é importante. O capítulo 9 da NBR6123 [1] apresenta alguns procedimentos para a determinação da resposta dinâmica das estruturas. Um estudo mais profundo sobre as ações dinâmicas do vento pode ser visto em [6]. Trataremos aqui apenas as estruturas com períodos fundamentais menores que 1s.

6.1 Coeficientes de pressão

Considere um sólido imerso em um fluido em regime permanente, figura 6.1. Para uma tomada de pressão estática situada em um ponto qualquer da superfície do sólido, aplicando-se o Teorema de Bernoulli, tem-se:

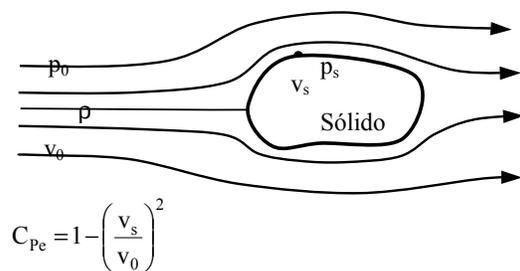


Figura 6.1 – Coeficiente de pressão externa

$$\frac{1}{2} \rho v_0^2 + p_0 = \frac{1}{2} \rho v_s^2 + p_s \quad 6.1$$

A pressão estática efetiva externa é a diferença entre a pressão p_s e a pressão ao p₀. É equivalente à diferença de pressão estática na superfície da edificação e a pressão atmosférica. Logo:

$$p_s - p_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 - \frac{1}{2} \rho v_s^2 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \left[1 - \left(\frac{v_s}{v_0} \right)^2 \right] = q \cdot C_{pe} \quad 6.2$$

$$C_{pe} = \left[1 - \left(\frac{v_s}{v_0} \right)^2 \right] = \frac{p_s - p_0}{q} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad 6.3$$

sendo:

Δp_e - a pressão efetiva externa

v_s - a velocidade do fluido próxima à superfície do sólido conforme indicado na figura 6.1

p_s - a pressão estática na superfície do sólido

v_0 - a velocidade do fluido ao longe

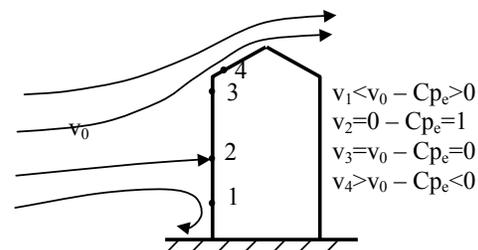
p_0 - a pressão estática do fluido ao longe

q – pressão dinâmica, equação 5.9

Analisando a equação 19, pode-se concluir que:

- O valor máximo de C_{pe} ocorre quando v_s=0, ou seja, o fluido estagna: C_{pe}=1;
- Quando v_s=v₀ o coeficiente de pressão se anula: C_{pe}=0
- Quando 0<v_s<v₀ o valor de C_{pe} é positivo – sobrepressão.
- Quando v_s>v₀ o valor de C_{pe} é negativo - sucção

As sobrepressões podem ser no máximo iguais à pressão de obstrução (C_{pe}=+1). Já as sucções podem ser muitas vezes numericamente superior a sobrepressão máxima ou pressão de obstrução.



Sobrepressões - C_{pe}>0 →

Sucções - C_{pe}<0 ←

Figura 6.2 – Variação do coeficiente de pressão externa na edificação



É importante determinar tanto os coeficientes de pressão externa como os coeficientes de pressão interna a uma edificação. Esses últimos são obtidos de forma análoga, dada por:

$$C_{p_i} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad 6.4$$

O coeficiente de pressão C_p é dado por:

$$C_p = C_{p_e} - C_{p_i} = \frac{\Delta p_e - \Delta p_i}{q} = \frac{\Delta p}{q} \quad 6.5$$

6.2 Coeficientes de forma

A diferença entre os coeficientes de forma e o de pressão é que os primeiros são aplicados a uma superfície plana e os segundos, a um ponto. De maneira semelhante aos coeficientes de pressão, definem-se os coeficientes de forma externo e interno.

Sendo F_e a força resultante das pressões externas sobre uma superfície de área A :

$$F_e = \int_A \Delta P_e \cdot dA = \int_A C_{p_e} \cdot q \cdot dA \quad 6.6$$

$$C_e = \frac{F_e}{qA} \quad 6.7$$

De forma análoga obtém-se:

$$C_i = \frac{F_i}{qA} \quad 6.8$$

e o coeficiente de forma C é dado por:

$$C = C_e - C_i = \frac{F_e - F_i}{qA} = \frac{F}{A} \quad 6.9$$

onde F é a força normal total sobre a superfície em estudo.

6.3 Coeficientes de força

A força global que atua em parte da edificação ou em toda ela é a soma vetorial de todas as forças devidas ao vento que atuam em suas partes. A

componente qualquer da força global que atua em uma direção específica é dada por:

$$F = C_f \cdot q \cdot A \quad 6.10$$

onde:

C_f – coeficiente de força, especificado para cada caso C_x , C_y , etc, obtido experimentalmente.

A – área de referência especificada em cada caso.

Quando a componente da força global tem a mesma direção do vento define-se o coeficiente de arrasto:

$$C_a = \frac{F_a}{q \cdot A_e} \quad 6.11$$

onde:

F_a – força de arrasto

A_e – área frontal efetiva: área de projeção ortogonal da edificação sobre um plano perpendicular à direção do vento (área de sombra)

Quando a componente da força global é perpendicular ao plano do horizonte (direção do eixo vertical) define-se o coeficiente de sustentação:

$$C_s = \frac{F_s}{q \cdot A} \quad 6.12$$

onde:

F_s – força de sustentação

Quando a componente da força global é normal à direção do vento e está contida no plano do horizonte define-se o coeficiente de força lateral:

$$C_L = \frac{F_L}{q \cdot A} \quad 6.13$$

onde:

F_L – força lateral

Cada um desses coeficientes pode ser especificado em relação a uma área particular, porém convém que esta área seja a mesma para comparar os resultados entre si.

Os coeficientes de força C_x , C_y e C_s são positivos quando orientados no sentido positivo dos próprios eixos. O coeficiente de arrasto C_a é positivo quando orientado no sentido do vento. O coeficiente lateral C_L é positivo quando, observando a edificação na

direção e sentido do vento, ele se referir a uma força lateral para a direita.

6.4 Coeficientes de momento torçor

Quando a força horizontal não passar pelo eixo vertical de torção da edificação, aparecerá o momento de torção M_t . O coeficiente de torção C_t é definido por:

$$C_t = \frac{M_t}{q \cdot A \cdot L} \quad 6.14$$

onde

L é uma dimensão linear de referência que pode ser a largura da edificação, por exemplo. Serve apenas para tornar adimensional o coeficiente de torção.

6.5 Pressão interna

Já foi vista a definição dos coeficientes de pressão interna no item 6.1. A pressão interna não afeta a força do vento global na estrutura, mas apenas parte delas, pois internamente as forças atuam em todas as paredes, piso e teto e se anulam entre si. Quando uma casa totalmente estanque estiver em uma tempestade, a diferença entre a pressão interna e externa pode causar rompimento de alguns elementos de vedação, e dependendo da força do vento pode causar a explosão da edificação. Uma diferença de 25 mm de mercúrio entre as pressões externa e interna representa uma pressão de 3300 N/m² agindo em todas as superfícies limítrofes da edificação.

A pressão interna depende do campo de pressões externas em torno da edificação e da posição e tamanho de todas as aberturas existentes. A figura 6.3 mostra algumas situações típicas.

A relação entre a soma das áreas das aberturas de uma superfície com sua área total é chamada de índice de permeabilidade. A NBR6123 (1988) recomenda valores de C_{pi} no capítulo 6.2, a partir do cálculo do índice de permeabilidade das superfícies da edificação e da localização das aberturas.

6.6 Recomendações de norma para os coeficientes aerodinâmicos

Os coeficientes de pressão são determinados com ensaios em túneis de vento de camada limite

atmosférica executando-se orifícios em pontos convenientemente escolhidos da superfície do modelo e ligando-os a transdutores elétricos de pressão ou a um manômetro múltiplo. Atualmente os transdutores elétricos são mais utilizados, pois permitem armazenar uma série temporal de pressões e com isso determinar as pressões médias, máximas e mínimas além do desvio padrão. Para o projeto da estrutura bastam as pressões médias, mas para as vedações, telhas, janelas é necessário saber as pressões máximas e mínimas ao longo da edificação. Essas pressões extremas ocorrem apenas em uma região pequena da edificação, sendo usados para dimensionar as ligações das telhas, por exemplo.

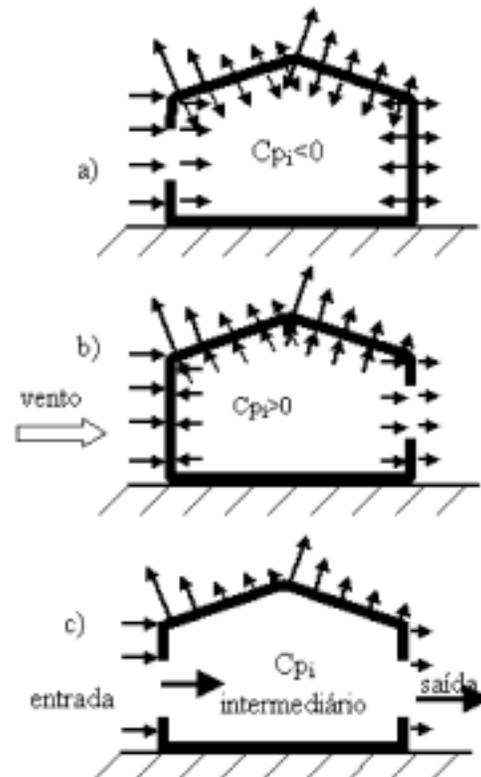


Figura 6.3 - Efeito das aberturas nas paredes de barlavento (a), sotavento (b) e em ambas (c).

Com os resultados dos ensaios, curvas isobáricas são traçadas para cada superfície da edificação, o que facilita a visualização espacial dos coeficientes de pressão. Muitas vezes a variação desses coeficientes dificulta o cálculo da estrutura da edificação.

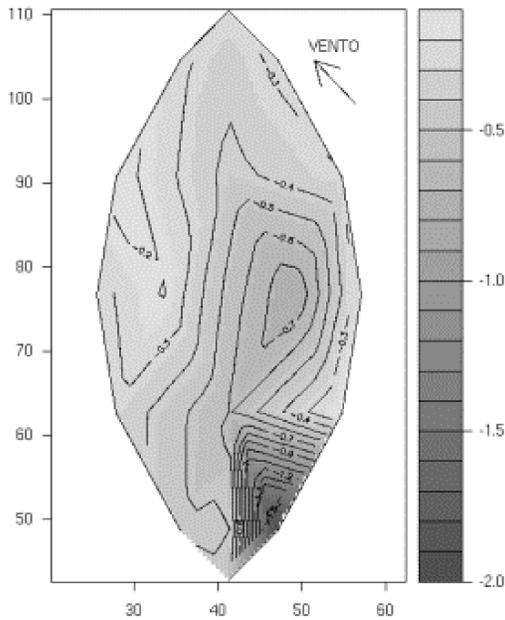


Figura 6.4 - Curvas isobáricas, C_{pe} . Cobertura curva do Centro de Eventos Culturais e Esportivos Pe. Vitor Coelho, Arquidiocese de Aparecida do Norte, SP. [7].

Desta forma as normas estabelecem valores médios dos coeficientes de pressão e de forma para as superfícies ou parte delas, de modo a simplificar o carregamento, equivalente ao real.

Valores médios de C_{pe} são apresentados em zonas onde ocorrem picos de sucção e devem ser utilizados apenas para dimensionar os elementos de vedação ou estruturais dentro dessas regiões. Esses valores de pico ocorrem geralmente para ventos diagonais às edificações, em áreas próximas às arestas. Na cobertura essas sucções altas ocorrem devido à formação de vórtices de topo que se desenvolvem ao longo dos beirais (figura 6.7). Tais efeitos podem se agravar devido às sobrepressões que ocorrem na face inferior dos beirais somando-se às sucções na face superior.

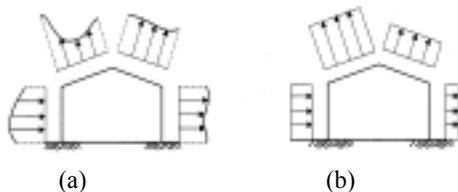


Figura 6.5 – (a) Possíveis valores de C_{pe} para o vento transversal à edificação. (b) Possíveis valores normalizados de C_e . [4].

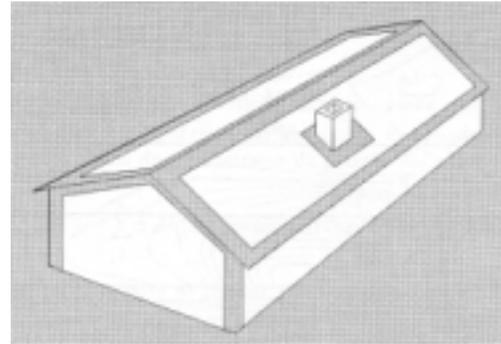


Figura 6.6 - Região onde ocorrem altos valores de C_{pe} . [4]

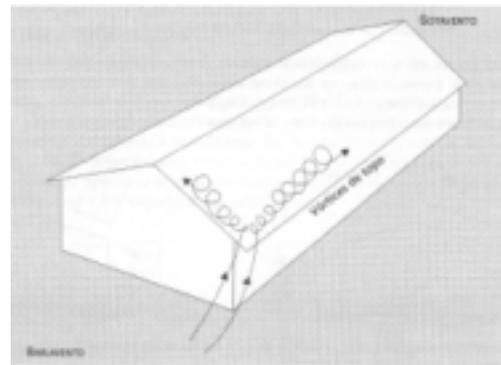


Figura 6.7 - Formação de vórtices próximo às arestas da cobertura. [4].

7. Exemplo de Cálculo.

Para auxiliar na fixação dos conceitos apresentados anteriormente, será desenvolvido um exemplo de cálculo das forças devidas ao vento em um galpão metálico para fins industriais. O galpão está localizado em subúrbio da cidade de São Paulo com topografia regular, paredes de alvenaria de blocos, telhas de aço trapezoidais e calhas junto à platibanda, figura 7.1.

7.1 Pressão dinâmica

Velocidade básica em São Paulo: $V_0 = 40$ m/s
Fator topográfico $S_1 = 1,0$
Rugosidade do terreno: subúrbio de grande cidade-rugosidade IV
Dimensões da edificação $L = 25$ m - classe B
vedações - classe A

Altura sobre o terreno:

$h=6,61\text{m}$ $S_2=0,79$

vedações- $S_2 = 0,82$

Fator estatístico $S_3 = 1,00$

Vedações $S_3 = 0,88$

Pressão

$q = 0,613 V_k^2$

$q_{\text{estr}} = 0,613 \times 31,6 = 612 \text{ Pa}$ (1Pa=1N/m²)

$q_{\text{vedação}} = 0,613 \times 28,92 = 512 \text{ Pa}$

Velocidade Característica do Vento

$V_k = S_1 S_2 S_3 V_0$

Estrutura $V_k = 1,0 \times 0,79 \times 1,0 \times 40 = 31,6\text{m/s}$

Vedações $V_k = 1,0 \times 0,82 \times 0,88 \times 40 = 28,9\text{m/s}$

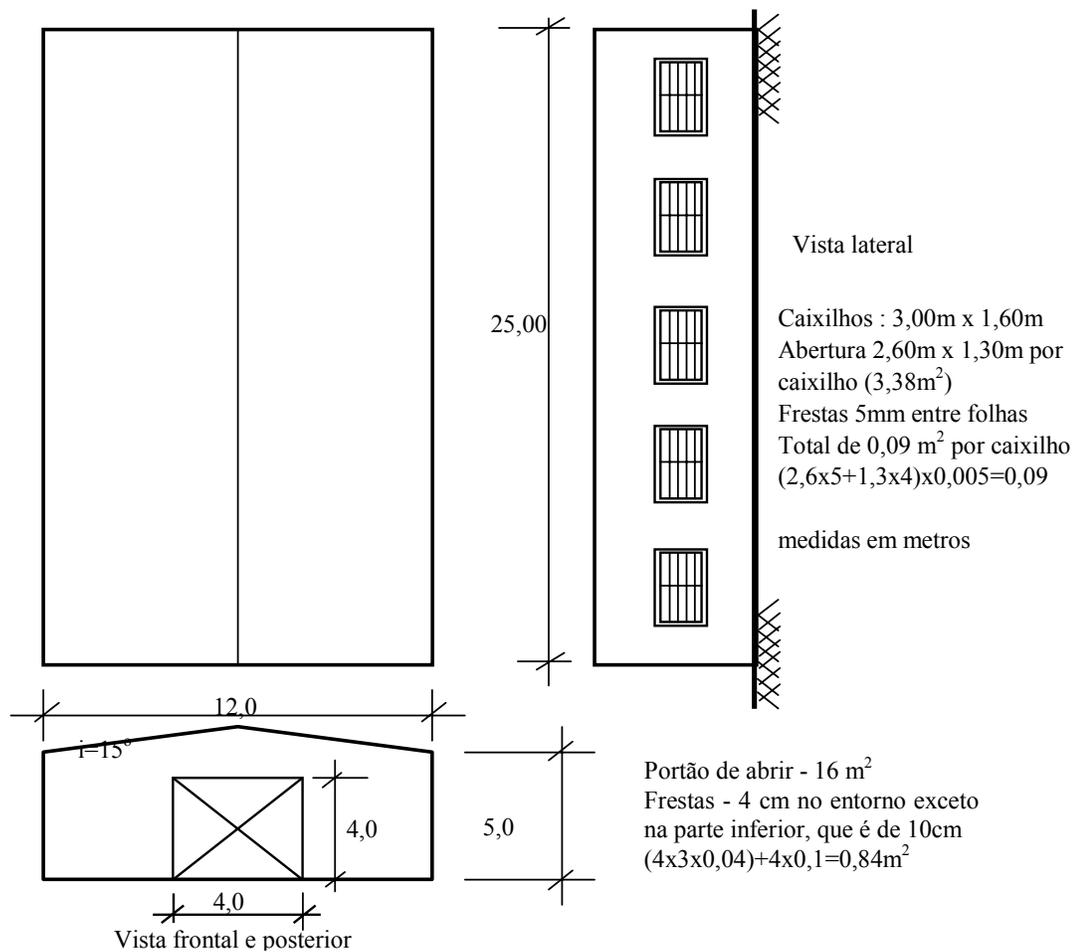


Figura 7.1 - Galpão industrial. Planta e vistas

7.2 Coeficientes de pressão e de forma externos

Paredes

Usa-se a tabela 4 da NBR6123 [1].

$$\text{Altura relativa: } \frac{h}{b} = \frac{5}{12} = 0,42$$

Proporções em planta:

$$\frac{a}{b} = \frac{25}{12} = 2,08$$

$$\frac{b}{3} = 4$$

$$\frac{a}{4} = 6,25$$

onde a é a dimensão maior em planta e b é a dimensão menor em planta, figuras 7.1

Os coeficientes de forma nas paredes da edificação estão mostrados na figura 7.2

Telhado

Usa-se a tabela 5 da NBR6123 [1] para $h/b=0,42$, $a/b=2,08$ e $\theta=15^\circ$ (figura 7.3 e 7.4).

Os coeficientes de pressão externos definidos em norma ocorrem geralmente para ventos oblíquos em relação à edificação e devem ser empregados apenas para dimensionamento dos elementos de vedação e estruturais que estejam totalmente inseridos dentro da área hachurada definida pela norma.

Para a parte inferior do beiral, o coeficiente de forma C_e é igual ao da parede correspondente. Nas saliências do telhado (chaminés, torres, etc.) deve ser considerado um coeficiente de forma $C_e=-1,2$ até uma distancia igual à metade da dimensão da diagonal da saliência vista em planta.

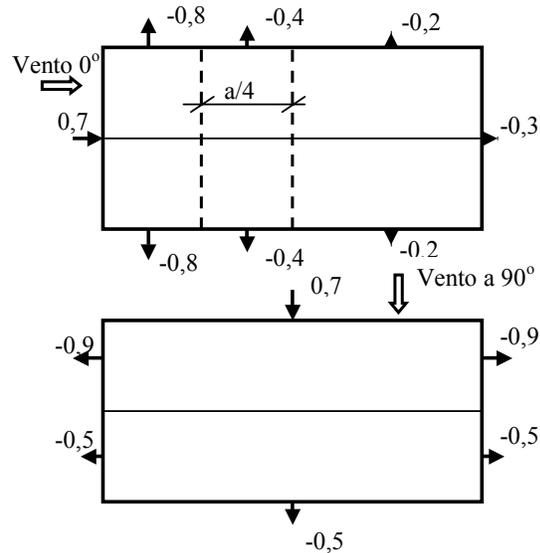


Figura 7.2 - Coeficientes de forma nas paredes

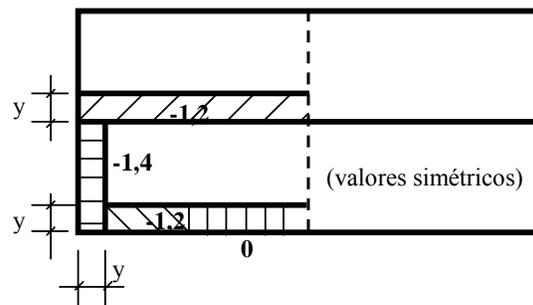


Figura 7.3 - Coeficientes de pressão médios ($y=h=5m$ ou $y=0,15b=1,8m$ - adotar o menor: $y=1,8m$).

7.3 Coeficiente de pressão interna

Para edificações com paredes permeáveis a norma permite considerar os coeficientes de pressão interna uniformes.

Devem ser analisadas todas as possibilidades quanto às disposições das aberturas como à direção do vento. É claro que, para a composição da pressão interna com a externa deve-se usar as mesmas direções e sentidos do vento.

A seguir apresentam-se os resultados de C_{pi} conforme o item 6.2.5 da norma NBR6123 [1].

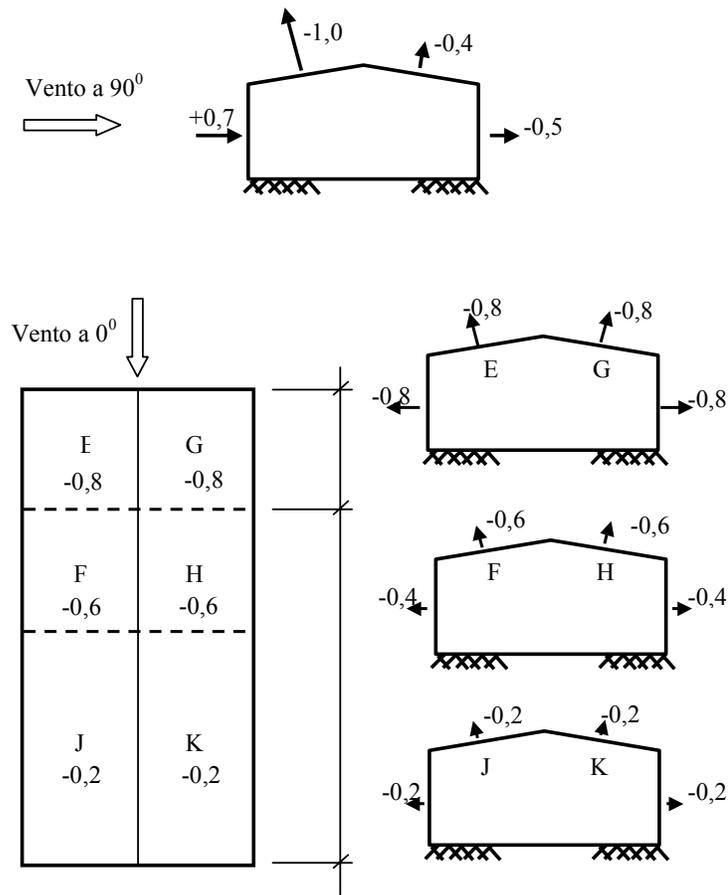


Figura 7.4 - Coeficientes de forma no telhado incluindo os da parede

Vento a 0 graus

Todas as portas e caixilhos fechados ou abertos
Permeabilidade igual em todas as faces:
 $C_{pi} = -0,3$ ou $C_{pi} = 0$

Abertura dominante na face de barlavento

Portão de barlavento aberto, demais elementos fechados

- Abertura do portão $AB = 16 \text{ m}^2$
- Demais aberturas nas zonas de sucção:
- Face de sotavento (portão fechado):
 $A_{s1} = 0,84 \text{ m}^2$
- Faces laterais (caixilhos fechados):
 $A_{s2} = 5 \times 0,09 \times 2 = 0,90 \text{ m}^2$
- Frestas nas telhas junto às calhas
 $A_{s3} = (0,025 \times 0,030 \times 8) \times 25 \times 2 = 0,3 \text{ m}^2$

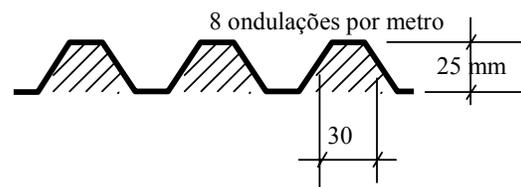


Figura 7.5 – Geometria da telha de aço

Frestas entre calha e terço e entre calha e rufo da platibanda (1cm cada)

$$A_{s4} = (0,01 + 0,01) \times 25 \times 2 = 1,0 \text{ m}^2$$

Frestas entre telhas e rufos dos oitões

$$A_{s5} = (0,01 \times 12,42 \times 2) = 0,25 \text{ m}^2$$

Resumo de frestas no telhado

$$A_{\text{telhado}} = 1,55 \text{ m}^2$$

$$\text{Total } A_s = 0,84 + 0,90 + 1,55 = 3,29 \text{ m}^2$$



$$\text{Proporção entre áreas } \frac{A_B}{A_s} = \frac{16}{3,29} = 4,86$$

portanto Cpi = +0,72 (valor interpolado)

Pode-se considerar em muitos casos que a probabilidade de ocorrência de uma abertura dominante, caso anterior, seja pequena. Se tivéssemos pelo menos uma janela lateral aberta (a) ou uma folha do portão aberta (b), teríamos:

$$(a) A_s = 0,84 + (4 \times 0,09 + 3,38) + 1,55 = 6,13 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_B}{A_s} = \frac{16}{6,13} = 2,6 \quad \text{Cpi} = +0,56$$

$$(b) A_s = (0,5 \times 0,84 + 8) + 0,9 + 1,55 = 11,79 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_B}{A_s} = \frac{16}{11,79} = 1,36 \quad \text{Cpi} = +0,24$$

Considerando as ocorrências mais prováveis, o projetista pode julgar como segura a adoção de Cpi = +0,56, caso contrário deve-se adotar Cpi = +0,72

Abertura dominante na face de sotavento

Cpi = -0,3 (adotar o mesmo valor de Ce nessa face)

Abertura dominante em uma face paralela ao vento

- não situada em zona de alto valor de Cpe

Cpi = -0,4 ou Cpi = -0,2 (mesmo valor de Ce no local da abertura)

- situada em zona de alto valor de Cpe (2,4 m a partir a face de barlavento)

Considerando 1/2 caixilho aberto nessa região, têm-se:

- abertura dominante AD = 1,69 m²

Área das demais aberturas em faces submetidas à sucção

Faces longitudinais A_{s1} = 9 x 0,09 = 0,81 m²

Portão de sotavento A_{s2} = 0,84 m²

Frestas no telhado A_{s3} = 1,55 m²

Total A_s = 3,2 m²

$$\frac{A_D}{A_s} = \frac{1,69}{3,2} = 0,53 \quad \text{Cpi} = -0,61$$

Adotaremos os valores de Cpi = -0,61 e Cpi = +0,56

Vento a 90 graus

Todas as portas e caixilhos fechados ou abertos

Permeabilidade igual em todas as faces:

Cpi = -0,3 ou Cpi = 0

Abertura dominante na face de barlavento

Todos os caixilhos de barlavento abertos, demais elementos fechados.

Abertura dos caixilhos AB = 5 x 3,38 = 16,9 m²

Demais aberturas nas zonas de sucção:

Face de sotavento (caixilhos fechados):

$$A_{s1} = 5 \times 0,09 = 0,45 \text{ m}^2$$

Nos oitões (portões fechados):

$$A_{s2} = 2 \times 0,84 = 1,68 \text{ m}^2$$

Frestas nas telhas junto às calhas

$$A_{s3} = 1,55 \text{ m}^2 \text{ (ver vento a } 0^\circ)$$

Total -A_s = 0,45 + 1,68 + 1,55 = 3,68 m²

$$\text{Proporção entre áreas } \frac{A_B}{A_s} = \frac{16,9}{3,68} = 4,59$$

portanto Cpi = +0,71 (valor interpolado)

De modo análogo ao vento a 0°, pode-se considerar em muitos casos que a probabilidade de ocorrência de uma abertura dominante seja pequena. Se tivéssemos pelo menos uma janela de sotavento aberta (a) ou uma folha do portão aberta (b), teríamos:

$$(a) A_s = (4 \times 0,09 + 3,38) + 1,68 + 1,55 = 5,42$$

$$\frac{A_B}{A_s} = \frac{16,9}{5,52} = 3,06 \quad \text{Cpi} = +0,6$$

$$(b) A_s = (1,5 \times 0,84 + 8) + 0,45 + 1,55 = 11,26 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_B}{A_s} = \frac{16,9}{11,26} = 1,50 \quad \text{Cpi} = +0,30$$

Tendo em vista valores parecidos com o do vento a 0°, o projetista pode julgar como segura a adoção de Cpi = +0,6 ou mesmo 0,56 adotado para o vento a 0°. Caso contrário deve-se adotar Cpi = +0,71.

Abertura dominante na face de sotavento

Caixilhos de sotavento abertos - Cpi = -0,5 (adotar o mesmo valor de Ce nessa face)

Abertura dominante em uma face paralela ao vento
- não situada em zona de alto valor de Cpe (os portões não situam nesta zona)

$$C_{pi} = \frac{-0,9 - 0,5}{2} = -0,7$$

Adotaremos os valores de Cpi=-0,7 e Cpi=+0,6

7.4 Coeficientes de forma e de pressão totais

Neste item faremos a composição dos coeficientes de pressão interna e externa. A figura 7.6 mostra os resultados para vento a 0º e a figura 7.7 mostra os resultados para o vento a 90º

Vento a 0 graus

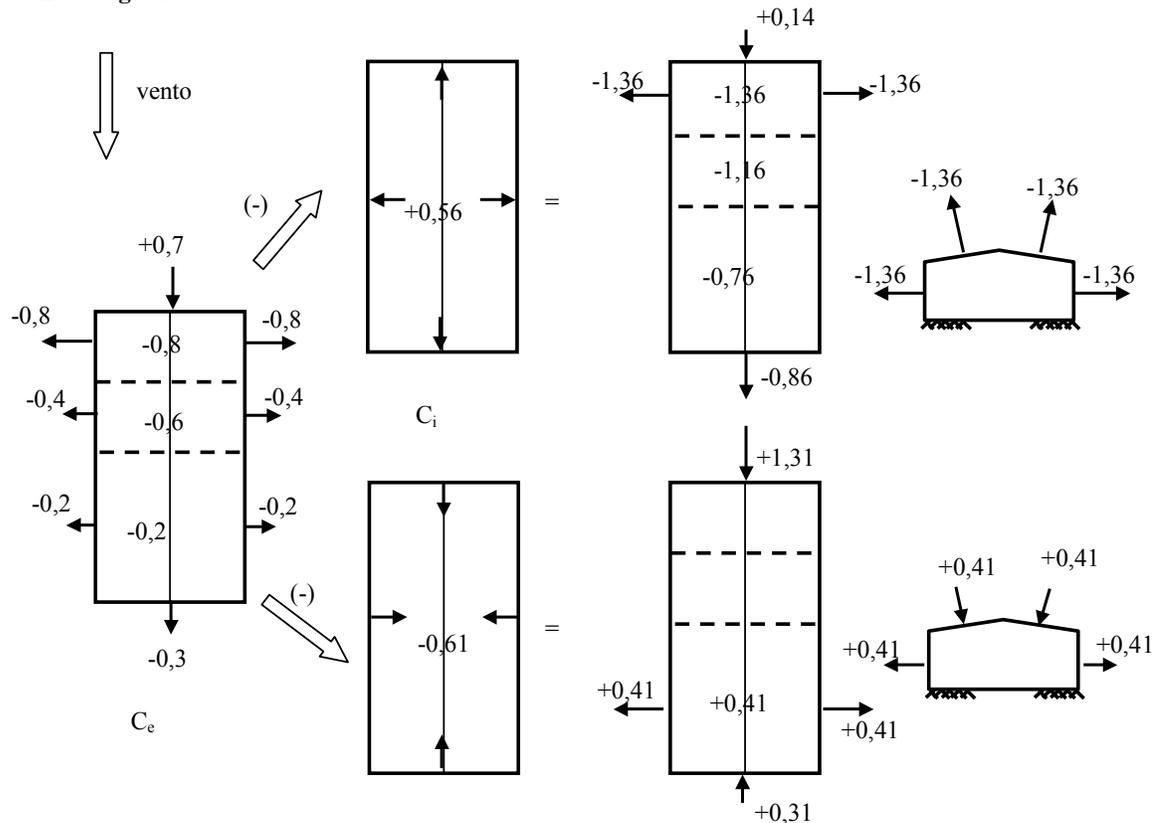


Figura 7.6 – Resultado final vento a 0º.

Vento a 90 graus

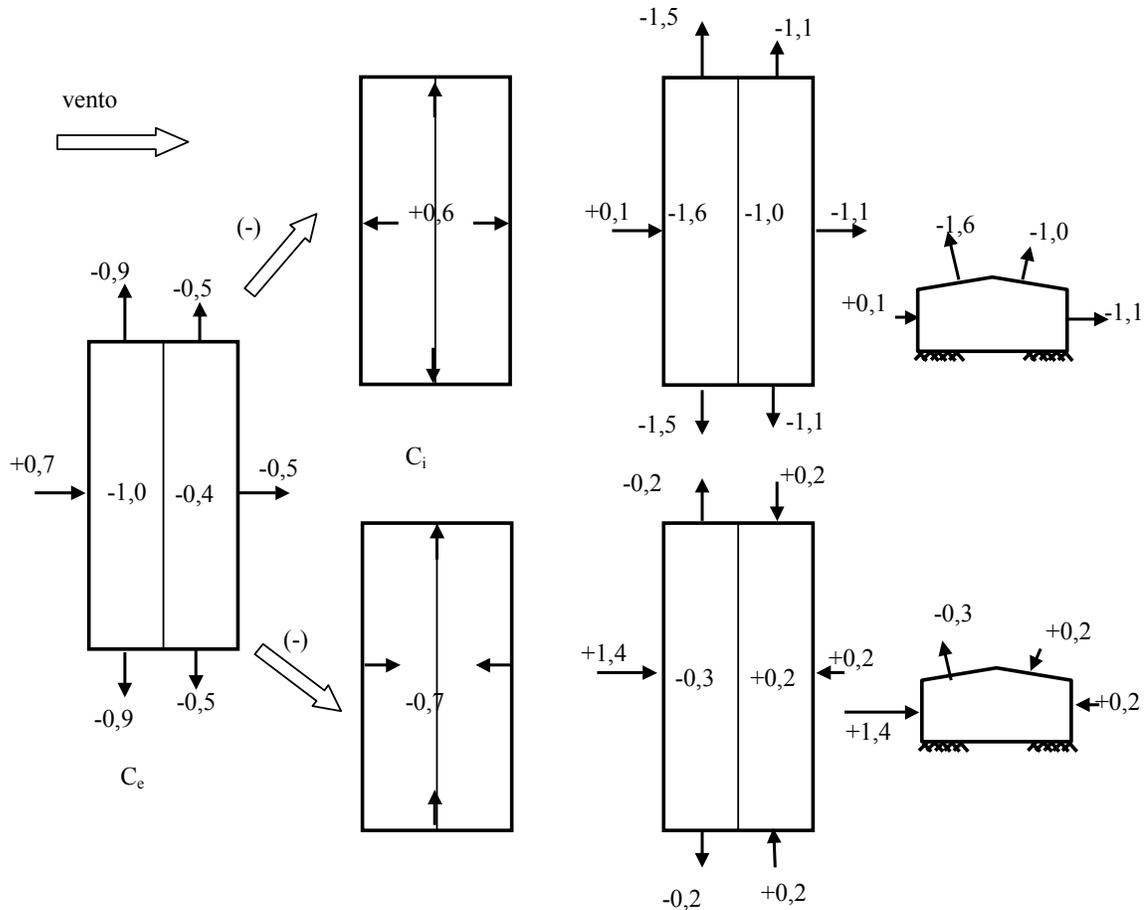


Figura 7.7 – Resultado final vento a 90°.

8. Conclusão

Foram apresentados os conceitos básicos do efeito do vento nas edificações fornecendo fundamentos aos engenheiros projetistas para melhor determinarem as forças dinâmicas do vento nas estruturas. Apresentou-se também um exemplo de cálculo dos coeficientes aerodinâmicos em um galpão industrial.

Os procedimentos para o cálculo da resposta dinâmica de estruturas esbeltas serão objeto de um próximo artigo, sendo os conceitos aqui introduzidos, necessários para o entendimento desses procedimentos.

Referências

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Forças devidas ao vento em edificações" - NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988.
- [2] J. Blessmann, "O vento na engenharia estrutural" 1.ed. Porto Alegre, UFRGS, 1995.
- [3] J. Blessmann, "A Escala Beaufort", Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Memórias, Jubileo, Prof. Júlio Ricaldoni, Punta Del Este, Uruguai, 2000, CDROM.



- [4] J.A.A. Pitta, “Ações do Vento em Edificações”, Editora da UFSCar, São Carlos, Série apontamentos, 2001.
- [5], N. J. Cook, “The designer’s guide to wind loading of building and structures”. London, Butterworths, 1985. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification.
- [6] J. Blessmann, “Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento”. 1.ed. Porto Alegre, UFRGS, 1998.
- [7] C. F. Carril; M. T. Pereira; P. J. S. Jabarto; G. Nader, “Ação do vento sobre a cobertura do Centro de Eventos Culturais e Poliesportivos Pe. Vitor Coelho”. Relatório Técnico, Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais, EPUSP, 2003.