

FORÇAS DEVIDO AO VENTO EM EDIFICAÇÕES: DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Tatie Leria¹; Ricardo Montefusco²

¹Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

²Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O comportamento do vento sobre estruturas pode admitir diversas formas e efeitos, causando, como no caso das grandes pressões e sucções localizadas, vários danos com trágicas consequências. Para evitar esses acidentes e projetar uma estrutura com segurança e economia é importante que se saiba interpretar a ação deste fenômeno natural sobre ela, o que pode ser feito, iniciando-se com a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos. Esses coeficientes são resultados das simulações em protótipos de edificações em laboratórios e que constam, em boa parte, na atual norma de vento. Para tal, foram construídos modelos em escala reduzida que foram conectados a medidores de pressão, utilizando-se do túnel de vento e comparando-se estes mesmos coeficientes com os tabelados pela norma brasileira NBR123/1988-“Forças devido ao vento em edificações”. A partir de uma análise das diferenças dos resultados obtidos dos ensaios com os tabelados pela norma, foram propostas sugestões sobre modificações ou ajustes necessários a serem feitos no equipamento, visando melhorias e aperfeiçoamentos no túnel de vento para propiciar um conhecimento técnico mais aprimorado neste setor de tão avançada tecnologia, na medida em que se pode aprofundar os estudos e simular ensaios com práticas de laboratório.*

Introdução

A cada ano que passa, com o desenvolvimento tecnológico e com a necessidade da redução de gastos, devido a grande competitividade do mercado, as estruturas vêm se tornando cada vez mais esbeltas e uma das ações de grande importância a ser considerada em seus dimensionamentos é a ação do vento sobre elas.

Podemos dizer que o estudo da aerodinâmica, no caso das construções civis, intensificou-se com a construção de um instrumento conhecido como Túnel de Vento. Isto, na década de 60, com os túneis meteorológicos da Colorado State University de Forte Collins, nos EUA (1963), e da University of Western Ontário, no Canadá (1965). Quanto ao Brasil, estes mesmos estudos progrediram a partir da década de 70 principalmente com a construção do “túnel de vento de camada limite atmosférica” (como são chamados, em particular, para experimentos em construções civis), pelo professor Joaquim Blesmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A procura de resultados mais fiéis originou o desenvolvimento de diversas técnicas de simulação das características de ventos naturais em laboratório. Por sua vez uma maior precisão dos resultados tornou-se importante nos últimos anos, à medida que, o desenvolvimento arquitetônico e estrutural permitiram a construção de edificações mais arrojadas, leves e esbeltas, como já citado

O projeto de pesquisa de Iniciação Científica aqui apresentado teve como um dos principais objetivos, a obtenção de valores dos coeficientes aerodinâmicos que devem ser levados em conta no cálculo de uma estrutura de Construção Civil, sujeita a ação do vento, e conseqüente comparação destes, com valores existentes e tabelados que constam na atual norma NBR 6123/1988 - “Forças devidas ao vento em edificações”.

Foram simuladas com certo rigor edificações de formas, a princípio, das mais comuns e que constam na norma supra citada.

Confeccionou-se modelos, em escala apropriada, que por sua vez foram conectados a dezenas de tomadas de pressão de um manômetro à óleo e ensaiados utilizando-se do túnel de vento de nossa Escola. Assim, foram tomadas medidas das pressões em vários pontos desses modelos para posterior cálculo e comparação dos coeficientes citados acima, com os que constam da norma brasileira vigente.

Além destes foram levantados vários perfis de velocidade, suas equações e as conseqüentes camadas limites e que permitem, então, simular dentro do túnel de vento condições muito próximas da realidade.

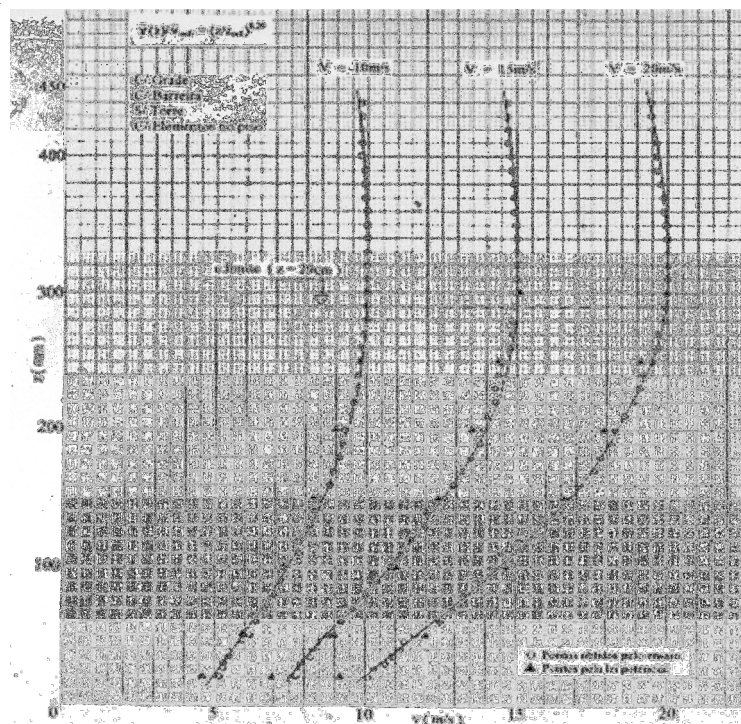


Figura 1-Perfis de velocidade média na posição dos modelos.

Os modelos foram ensaiados em fluxo razoavelmente uniforme, de baixa turbulência e com número de Reynolds subcrítico.

É importante definir alguns dos aspectos que regem as forças devidas ao vento, antes de passar a seu cálculo. Define-se o termo barlavento como sendo a região de onde sopra o vento (em relação a edificação) e sotavento, a região oposta àquela de onde sopra o vento (vide figura 2).

Quando o vento sopra sobre uma superfície existe uma sobrepressão (sinal positivo), porém, em alguns casos pode acontecer o contrário, ou seja, existir sucção (sinal negativo) sobre a superfície. O vento sempre atua perpendicularmente a superfície que obstrói sua passagem (vide figura 2).

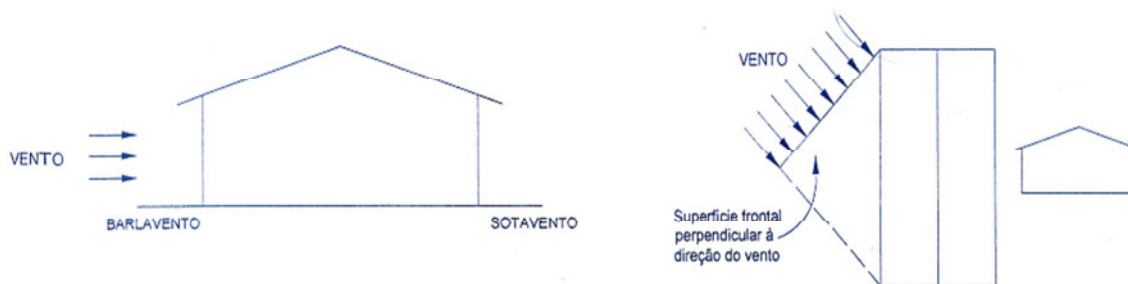


Figura 2 - Definições básicas do vento

Os cálculos são determinados a partir das velocidades básicas obtidas no campo por meio de torres com anemômetros, e de acordo com a NBR6123 a 10 metros de altura, em terreno aberto e plano. A velocidade básica do vento é uma rajada de três a cinco segundos de duração (em média) mas que tem uma probabilidade de ser superada, em intensidade, de 60% num período de recorrência de 50 anos. Ela é definida por V_o .

Coefficientes de pressão e forma aerodinâmicos:

Os valores de sobrepressões ou sucções são apresentados em forma de tabelas na NBR6123/88, assim como, em normas estrangeiras e dependem exclusivamente da forma e da proporção da construção e de sua localização.

Os coeficientes de pressão externa têm valores definidos para paredes, em construções com base retangular, telhados a uma ou duas águas, com base retangular, telhados em arco com base retangular e outros. Para edificações que não constam na NBR6123/88, e que não podem ser extrapoladas a partir dos dados nela expressa, recomenda-se que sejam realizados ensaios em túnel de vento para determinar os valores de coeficientes de pressão externos.

Determinação da pressão dinâmica:

Pelo Teorema de Bernoulli, válido para fluidos perfeitos (incompressíveis e não viscosos) em regime permanente a conservação da energia é traduzida por :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + Z = \text{constante}$$

Onde:

$$\frac{v^2}{2g}$$

é a Energia de Cinética por unidade de peso relacionada com a velocidade.

$$\frac{p}{\gamma}$$

é a Energia de Pressão por unidade de peso ou também chamada de Energia Piezométrica.

Z é a Energia Potencial por unidade de peso ou Energia Geométrica de Posição.

Por meio da expressão anterior, é estabelecido que a energia entre dois pontos de uma linha de fluxo ou corrente deve permanecer constante. Este conceito pode ser utilizado no túnel de vento, na determinação da pressão provocada pelo vento numa edificação, como segue: Para dois ou mais pontos do fluido em movimento permanente, com aproximadamente o mesmo z, resulta:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} = \text{constante}$$

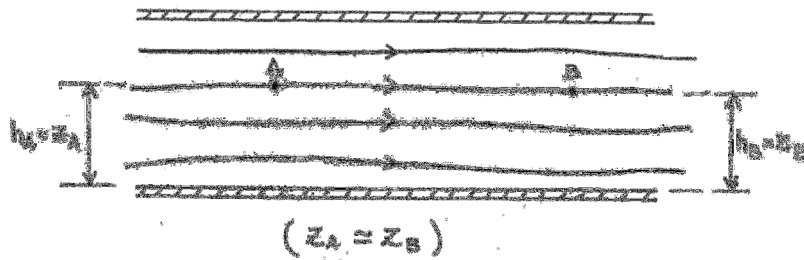


Figura 3– Pontos com o mesmo z, em um fluido em movimento

Aplicando a expressão anterior, para dois pontos no fluxo (ar em movimento),tem-se:



Figura 4 – Dois pontos no fluxo

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} = \text{constante}$$

Ou, multiplicando os dois lados da equação por γ temos

$$\gamma \left(\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} \right) = \text{constante}$$

onde $\gamma \frac{v^2}{2g}$ é a pressão dinâmica e p é a pressão estática

Nos dois pontos: (A) e (B) do fluxo em equilíbrio, vale:

$$\frac{\gamma v_A^2}{2g} + p_A = \frac{\gamma v_B^2}{2g} + p_B$$

Como v_B igual a zero (0,0):

$$\frac{\gamma v_A^2}{2g} + p_A = p_B$$

p_B = pressão estática (no ponto)

Fazendo-se a diferença entre p_A e p_B ,obtemos:

$$p_A - p_B = \Delta p = \frac{\gamma v_A^2}{2g} = q; \quad q = \frac{\gamma v^2}{2g}$$

Substituindo os valores:

$\gamma = 1,2253 \text{ Kgf.m}^{-3}$ (peso específico do ar)

$g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$ (aceleração da gravidade)

Resulta:

$$q = (1,2253V^2)/(2*9,80665) = V^2/16(\text{Kgf.m}^{-2}) \quad \text{ou} \quad q = V^2/1,6 (\text{N.m}^{-2})$$

q é chamado de pressão de obstrução ou pressão efetiva em um ponto de estagnação, que é igual a pressão dinâmica em um ponto não perturbado pelo objeto.

A pressão dinâmica ou de obstrução do vento, em condições normais de pressão (1 Atm=101320 MPa) e temperatura a 15°, é dada, então, pela expressão:

$$q = 0,613 V_k^2 (\text{N.m}^{-2})$$

Determinação da velocidade característica V_k :

A velocidade característica V_k : é a velocidade usada em projeto, sendo que são considerados os fatores topográficos (S_1), influência da rugosidade(obstáculos no entorno da

edificação) e dimensões da edificação (S_2) e o fator de uso da edificação (S_3) que considera a vida útil e o tipo de uso. A velocidade característica pode ser expressa como:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3$$

Onde:

V_0 : velocidade básica

S_1 :fator topográfico

S_2 :fator de rugosidade e dimensões da edificação

S_3 :fator estatístico

Materiais e Métodos

Para este projeto de pesquisa utilizou-se do equipamento e instrumentos que estão na sala F07 (bloco F) como: o túnel de vento de camada limite atmosférica, manômetros a óleo, pratos giratórios apropriados para suporte e fixação dos modelos, dispositivos como telas retificadoras de fluxo, colméias, dispositivos de rugosidade artificial para simulação da camada limite atmosférica, tubo de pitot-prandtl e gerador de fumaça, entre outros.

Os materiais básicos para a confecção das maquetes se constituíram de: papel paraná, mangueiras de silicone, colas, e réguas apropriadas. Foram construídos modelos em escala apropriada com $a=18\text{cm}$, $b=6\text{cm}$, e $h=6\text{cm}$ com três inclinações diferentes para os telhados, sendo $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$ e $\theta=60^\circ$. E outros três modelos com $a=18\text{cm}$, $b=6\text{cm}$, $h=6\text{cm}$ com as mesmas inclinações já citadas.

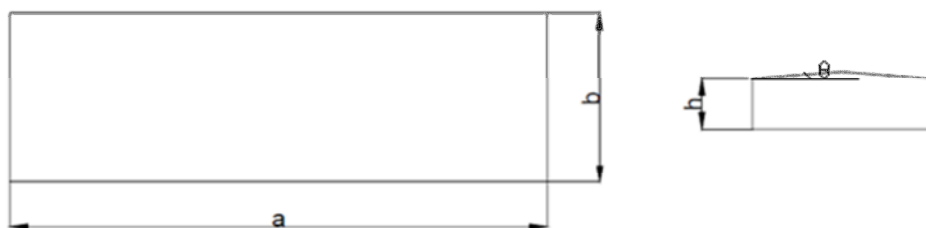


Figura 5 – Dimensões dos modelos

O método utilizado para os ensaios envolveu, basicamente, aplicação de Análise Dimensional, Semelhança de Modelos, e conhecimentos de Mecânica dos Fluidos e Sistemas de Modelagem.

Entre os vários modelos possíveis de simulação, trabalhou-se com o Icônico, que é aquele que representa de forma mais fiel possível o Sistema Físico Real (S.F.R.). Sua característica básica é o alto grau de semelhança com o seu equivalente real.

Uma grande utilidade desse tipo de modelo é a possibilidade de, através dele, poder-se alterar o projeto com aperfeiçoamentos que melhorem a segurança de operação e manutenção, ou mesmo definir de forma mais realística detalhes construtivos, antes de se construir o S.F.R.

O S.F.R. é representado através de modelos físicos – geralmente com dimensões diferentes das reais – com o propósito de verificar como ele funcionará.

Uma forma de simulação bastante usada pelo engenheiro é a experimentação que envolve testes com protótipos ou modelos em condições controladas, como por exemplo, ensaios em túneis de vento, para avaliar a influência da forma de um projeto no seu arraste aerodinâmico.

Segundo a norma brasileira de vento, a NBR 6123/88, os modelos devem ser ensaiados pelo menos em duas direções preferenciais de ataque do vento; uma a 0° e outra a 90°, uma vez que estes, de uma maneira geral, representam os casos mais desfavoráveis para as estruturas.

Para tal, então, posicionou-se cada modelo segundo essas orientações ao vento no túnel e para cada uma delas foram tomadas as pressões em todos os pontos da maquete.

Observou-se quais seriam os pontos de pressão positiva ou sobrepressão e quais os pontos de sucção ou pressão negativa para posterior tabelamento e análise.

A formulação utilizada e a seqüência dos cálculos foram executadas de acordo com o item anterior e os coeficientes aerodinâmicos, assim, tabelados.

Resultados e discussão

Foram ensaiados 06(seis) modelos cujas proporções entre os lados e a altura, bem como as inclinações dos telhados, são idênticos aos estabelecidos pela norma de vento NBR 6123/88.

De todos esses, apresenta-se neste trabalho, o resultado do ensaio do modelo descrito abaixo (para vento a 0° e a 90°), resumido através das tabelas que relacionam cada ponto de tomada de pressão ao respectivo Cp. Na seqüência, apresentam-se os diagramas comparativos entre os coeficientes de pressão obtidos no laboratório e os tabelados pela norma (figuras 8 a 14).

No túnel de vento da Mauá, o fluido utilizado é um óleo não volátil cuja densidade é 0,885 em relação a da água, portanto, as pressões ao redor dos pontos de tomada de pressão (ΔP corrigido) será a leitura feita pelo manômetro multiplicada pela densidade desse fluido. O coeficiente de pressão externo, por sua vez, será a tomada de pressão dividido pela pressão dinâmica.

Modelo:

$a=18\text{cm}, b=6\text{cm}, h=6\text{cm}$ e $\theta=30^\circ$

Velocidade do vento no ensaio: $V=20\text{m.s}^{-1}$

Pressão dinâmica : $q = V_k^2/16$ $q = 20^2/16 = 25 \text{ Kgf.m}^2$

Como exemplo, a Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam os resultados dos 49 pontos de tomada de pressão.



Figura 6 – Foto do modelo

Os valores dos coeficientes de pressão para o vento a 0° graus estão apresentados na Tabela 1, e os valores dos coeficientes para o vento a 90° graus estão presentes na tabela 2.

Tabela 1

Pontos	ΔP leituras no manômetro	ΔP corrigido	C.P
1	10	8,9	0,4
2	9	8,0	0,3
3	9	8,0	0,3
4	8	7,1	0,3
5	8	7,1	0,3
6	7	6,2	0,2
7	7	6,2	0,2
8	8	7,1	0,3
9	7	6,2	0,2
10	4	3,5	0,1
11	-5	-4,4	-0,2
12	-6	-5,3	-0,2
13	-7	-6,2	-0,2
14	-8	-7,1	-0,3
15	-9	-8,0	-0,3
16	-4	-3,5	-0,1
17	-5	-4,4	-0,2
18	-6	-5,3	-0,2
19	-8	-7,1	-0,3
20	-8	-7,1	-0,3
21	-4	-3,5	-0,1
22	-5	-4,4	-0,2
23	-6	-5,3	-0,2
24	-8	-7,1	-0,3
25	-8	-7,1	-0,3
26	-4	-3,5	-0,1
27	-4	-3,5	-0,1
28	-5	-4,4	-0,2
29	-8	-7,1	-0,3
30	-12	-10,6	-0,4
31	-4	-3,5	-0,1
32	-15	-13,3	-0,5
33	-5	-4,4	-0,2
34	-8	-7,1	-0,3
35	-12	-10,6	-0,4
36	-15	-13,3	-0,5
37	-5	-4,4	-0,2
38	-5	-4,4	-0,2
39	-6	-5,3	-0,2
40	-7	-6,2	-0,2
41	-9	-8,0	-0,3
42	-15	-13,3	-0,5
43	-5	-4,4	-0,2
44	-5	-4,4	-0,2
45	-5	-4,4	-0,2
46	-6	-5,3	-0,2
47	-6	-5,3	-0,2
48	-8	-7,1	-0,3
49	-15	-13,3	-0,5

Tabela 2

Pontos	ΔP leituras no manômetro	ΔP corrigido	C.P
1	-10	-8,9	-0,4
2	-10	-8,9	-0,4
3	-8	-7,1	-0,3
4	-7	-6,2	-0,2
5	-9	-8,0	-0,3
6	-8	-7,1	-0,3
7	-7	-6,2	-0,2
8	-8	-7,1	-0,3
9	-7	-6,2	-0,2
10	-7	-6,2	-0,2
11	7	6,2	0,2
12	7	6,2	0,2
13	7	6,2	0,2
14	5	4,4	0,2
15	3	2,7	0,1
16	6	5,3	0,2
17	5	4,4	0,2
18	4	3,5	0,1
19	3	2,7	0,1
20	0	0,0	0,0
21	5	4,4	0,2
22	5	4,4	0,2
23	4	3,5	0,1
24	1	0,9	0,0
25	-1	-0,9	0,0
26	-4	-3,5	-0,1
27	-3	-2,7	-0,1
28	-3	-2,7	-0,1
29	-4	-3,5	-0,1
30	-3	-2,7	-0,1
31	-3	-2,7	-0,1
32	-5	-4,4	-0,2
33	-2	-1,8	-0,1
34	-2	-1,8	-0,1
35	-3	-2,7	-0,1
36	-3	-2,7	-0,1
37	-6	-5,3	-0,2
38	-4	-3,5	-0,1
39	-4	-3,5	-0,1
40	-2	-1,8	-0,1
41	-3	-2,7	-0,1
42	-3	-2,7	-0,1
43	-4	-3,5	-0,1
44	-5	-4,4	-0,2
45	-4	-3,5	-0,1
46	-4	-3,5	-0,1
47	-3	-2,7	-0,1
48	-3	-2,7	-0,1
49	-2	-1,8	-0,1

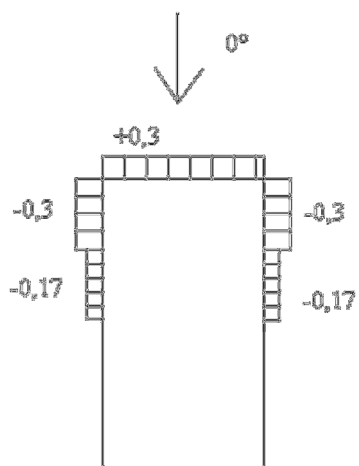


Figura 7 - Resultado obtido no ensaio para as paredes. Vento à 0°

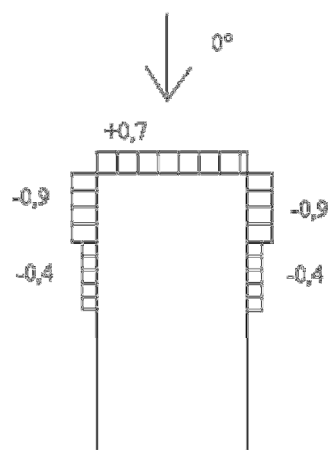


Figura 8 - Valores da norma para as paredes desse modelo. Vento à 0°

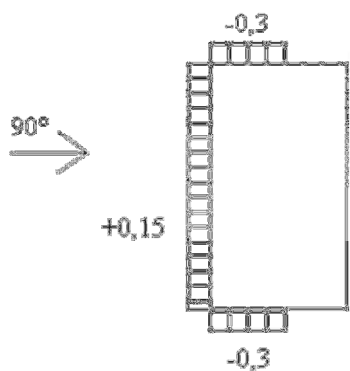


Figura 9 - Resultado obtido no ensaio para as paredes. Vento à 90°

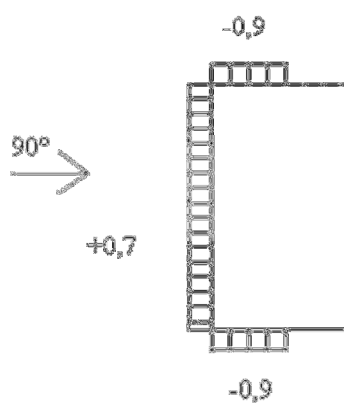


Figura 10 - Valores da norma para as paredes desse modelo. Vento à 90°

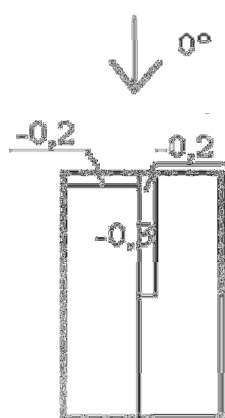


Figura 11 - Resultado obtido no ensaio para o telhado. Vento à 0°

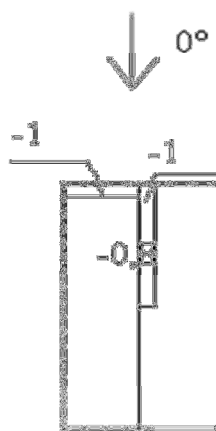


Figura 12 - Valores da norma para o telhado desse modelo. Vento à 0°

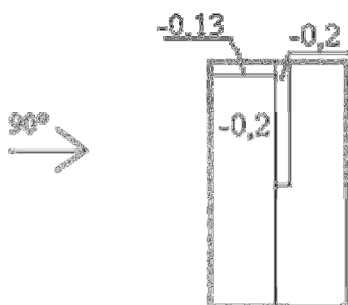


Figura 13 - Resultado obtido no ensaio o telhado. Vento à 90°

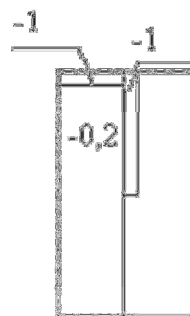


Figura 14 - Valores da norma para para telhado desse modelo. Vento à 90°

Cumpre ressaltar que, o coeficiente de pressão em um modelo acaba sendo a “digital” desse modelo à esse fenômeno, uma vez que ele é típico de cada geometria (forma e rugosidade) e conseqüentemente, por semelhança, de cada estrutura real.

Esses coeficientes obtidos em laboratório, são a “chave” de funcionamento da estrutura real, pois, com eles, pode-se construir o S.F.R. em qualquer localidade e se obter as novas pressões em todos os pontos, permitindo, assim, um dimensionamento seguro e econômico da estrutura a ser construída. Basta, para tal, como mostrado na sequência, conhecer a velocidade básica local do vento.

Observar que: $C_p = \Delta p / q$; sendo C_p o coeficiente de pressão, Δp a pressão registrada no manômetro e q a pressão dinâmica.

Obtido C_p , tem-se: $\Delta p = C_p \times q$; $q = (V_k)^2 / 16$; $V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$;

Sendo: Δp a nova pressão no ponto a considerar, V_k a velocidade característica do vento; V_0 a velocidade básica do vento tirado das isopletas e S_1 a S_3 os fatores topográficos e de ocupação, típicos da obra e do local da construção.

Coeficiente de pressão interna:

O ensaio foi realizado em um modelo de um galpão industrial com abertura dominante de uma das paredes em relação as demais, como pode ser visto nas figuras 15 e 16.



Figura 15

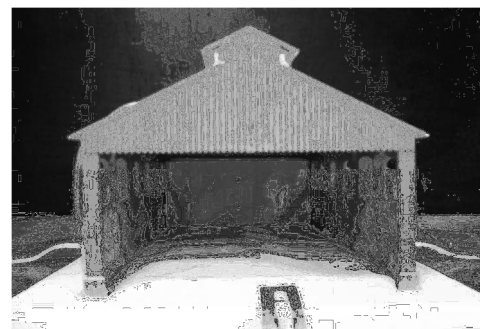


Figura 16

Resultados para todos os pontos:

Vento a 0°:

Leitura no manômetro = - 5

Valor corrigido = $-5 \times 0,885 = -4,425$

$V = 20 \text{ m.s}^{-1}$ portanto $q = 25 \text{ Kgf.m}^2$

CPI = -0,2

Vento a 90°:

Leitura no manômetro = - 10

Valor corrigido = $-10 \times 0,885 = -8,85$

$V = 20 \text{ m.s}^{-1}$ portanto $q = 25 \text{ Kgf.m}^2$

CPI = -0,4

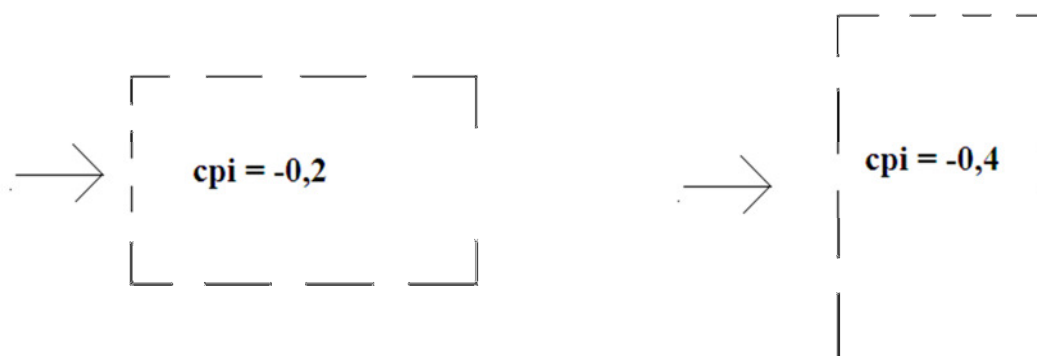


Figura 18 - Valores obtidos no ensaio, do lado esquerdo vento a 0° e do lado direito vento a 90°.

Valores retirados da Norma: Para esse modelo com o vento a 0° $c_{pi} = -0,3$ e para o vento a 90° $c_{pi} = -0,4$.

Comprova-se com este ensaio a constância da pressão interna em toda a edificação.

Conclusões

Por serem grandes as dimensões do S.F.R., a confecção de modelos em escala reduzida torna-se bastante vantajosa, pois, trás economia e mais simplicidade na execução e controle dos ensaios, não sendo necessários complexos recursos técnicos e econômicos para sua elaboração.

O uso de modelos permite que as medições sejam mais facilmente efetuadas, quando comparadas às que seriam feitas no S.F.R..

Quando da utilização de um modelo na descrição de um fenômeno físico ou na previsão de seu comportamento, sempre aparecerão erros ou diferenças entre os resultados previstos – calculados – e os medidos. Diferenças essas que ocorrem devido às simplificações introduzidas para a formulação dos modelos e também porque elas são dependentes da forma de abordagem do problema e dos objetivos pretendidos com a solução.

Nos ensaios aqui efetuados, houveram algumas diferenças entre os resultados obtidos dos tabelados pela atual norma.

Essas diferenças podem ter ocorrido devido a falta de regularidade nas vedações de borracha das partes componentes do Túnel de Vento entre o Efusor, a Câmara de Ensaios e o

Difusor de maneira a não se ter controle da invariabilidade da pressão estática interna ao equipamento, principalmente na Câmara de Ensaio.

A diferença na rugosidade do piso do túnel da Mauá com aquela que foi utilizada quando da obtenção dos valores inclusos na Norma Brasileira, também deve ser analisada.

A Norma Brasileira não indica valores numéricos a serem utilizados nos efeitos de vizinhança por serem muitos variados e, portanto, não se pode fazer um modelo genérico. Porém, informa que para uma análise mais detalhada, devem-se medir os efeitos em túnel de vento e assim determinar os problemas que as condições de vizinhança podem causar.

Repetir os ensaios em cada modelo num espaço mais curto de tempo, em termos de tomada de dados (medidas) os tornariam mais aceitáveis, uma vez que, até o presente momento, não houve oportunidade para tal e uma vez também que, tendo sido realizados em dias com condições ambientais de temperatura, umidade e até de pressão diferentes influenciaram nos resultados.

Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR-6123 – *Forças devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1988.
- Blesmman, J. *Aerodinâmica das Construções*. 2ª Ed., Porto Alegre, UFRGS, 1990.
- Cook, N. J. *The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures*. Part 2: Static Structures. London, UK. Building Research Establishment, 1990.
- Loreda-Sousa, A. M. “Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel-de-Vento”, Porto Alegre, UFRGS, 2004.
- Niels, F. *Model Law and Experimental Technique for Determination of Wind Loads on Buildings*. Copenhagen, Denmark, p. 182-196, 1970.
- Stangroom, P. *CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain*. Doctor of Philosophy Thesis, University of Nottingham, London, 2004.
- Montefusco, R. *Introdução à Engenharia: Análise e Avaliação*. Dissertação de Mestrado, São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- Montefusco, R. *Projeto, Construção e Calibração de um Túnel-de-Vento*. São Caetano do Sul, Escola de Engenharia Mauá, 1998.