

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Alves Guarienti

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO E
LOCALIZAÇÃO DE ABERTURAS NAS PRESSÕES
INTERNAS MÉDIAS EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Porto Alegre
junho 2010

LUCAS ALVES GUARIENTI

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO E
LOCALIZAÇÃO DE ABERTURAS NAS PRESSÕES
INTERNAS MÉDIAS EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza

Porto Alegre
junho 2010

LUCAS ALVES GUARIENTI

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TIPO E
LOCALIZAÇÃO DE ABERTURAS NAS PRESSÕES
INTERNAS MÉDIAS EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2010

Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Eng. Elvis Antônio Carpeggiani
M.Sc. pela UFRGS

Eng. Mario Gustavo Klaus Oliveira
Dr. pela UFRGS

Prof. Eng. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá

Dedico este trabalho a meus pais, José Luiz e Lisette, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir transpor mais essa etapa da vida.

Agradeço a minha família, pai, mãe e minha irmã que sempre lutaram para proporcionar-me o melhor, e por estarem sempre ao meu lado nos momentos de dificuldade.

Ao primo e amigo Fábio pelo apoio e contribuição nos últimos meses do curso.

Agradeço ao meu orientador Prof. Acir Mércio Loredou-Souza pelos ensinamentos, dedicação, paciência, colaboração e amizade, fundamentais para a conclusão deste trabalho e que também foram de grande valor para meu crescimento tanto pessoal como profissional.

A Professora Carin Maria Schmitt, pelo auxílio e dedicação durante o período de elaboração deste trabalho.

Aos amigos e colegas que sempre me apoiaram.

Enfim agradeço a todos aqueles que de alguma maneira colaboraram para a finalização deste trabalho de conclusão de curso.

Sonhos são gratuitos;
transformá-los em realidade tem um preço.

Autor desconhecido

RESUMO

GUARIENTI, L. A. **Determinação da Influência do Tipo e Localização de Aberturas nas Pressões Internas em Pavilhões Industriais**. 2010. 81 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho tem por objetivo a comparação entre métodos analítico e experimental para a determinação das pressões internas em pavilhões industriais. Com isso, deseja-se verificar qual a influência que o tipo e a localização de aberturas exercem sobre os coeficientes de pressão interna no pavilhão estudado. Os resultados analíticos tiveram sua fundamentação baseada pela NBR 6123/1988 e na bibliografia estudada. Os resultados práticos adviram de ensaios realizados em túnel de vento. Como o procedimento para cálculo das pressões internas de acordo com a Norma considera somente a área das aberturas, é objetivo do trabalho demonstrar que nem só a área exerce influência nas pressões internas, mas também a forma, o tipo, a geometria e a localização das aberturas constantes nas faces de pavilhões industriais. Com os resultados analíticos e experimentais, pode-se mensurar as diferenças em termos numéricos. O trabalho aborda nove casos de um mesmo pavilhão com diferentes combinações de aberturas em suas faces. As diferenças entre os métodos de cálculo foram analisadas caso a caso e determinou-se diferenças entre resultados analíticos e experimentais. É estipulada uma parametrização para essas diferenças e hierarquizada a relação de influência do tipo de abertura nas pressões internas para o pavilhão considerado no trabalho. Para todos os nove casos estudados, a constatação foi de que o caso com aberturas laterais correspondentes a uma vez à área da abertura do oitão frontal obteve maior diferença entre o método analítico e o experimental, seguido pelo caso em que não havia abertura lateral, e finalmente pelo caso em que a abertura lateral correspondia à metade da área da abertura do oitão frontal.

Palavras-chave: permeabilidade; aberturas; pavilhão industrial; coeficiente de pressão interna.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das etapas do trabalho.....	16
Figura 2: isopletas da velocidade básica do vento V_0	18
Figura 3: fator topográfico $S_1(z)$	20
Figura 4: ângulo de incidência do vento na edificação.....	31
Figura 5: distribuição de pressões em modelo de edifício alto em túnel de vento aeronáutico.....	39
Figura 6: distribuição de pressões em modelo de edifício alto em túnel de vento de camada limite atmosférica.....	40
Figura 7: influência da localização da abertura dominante.....	47
Figura 8: desenho esquemático do pavilhão estudado.....	52
Figura 9: localização da inserção dos módulos de fechamento lateral e de oitão.....	53
Figura 10: janelas tipo portão no oitão.....	54
Figura 11: janelas tipo portão no fechamento lateral.....	54
Figura 12: permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares no oitão.....	54
Figura 13: permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares no fechamento lateral.....	54
Figura 14: janelas tipo basculante para oitão.....	55
Figura 15: ângulo de incidência do vento no pavilhão.....	56
Figura 16: combinações de fechamentos laterais no pavilhão estudado.....	56
Figura 17: diagrama dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial estudado.....	59
Figura 18: diagrama tridimensional dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial estudado.....	60
Figura 19: convenção adotada para denominação dos fechamentos laterais do pavilhão industrial estudado.....	61
Figura 20: caso 1.....	62
Figura 21: caso 1a.....	62
Figura 22: caso 1b.....	63
Figura 23: caso 2.....	64
Figura 24: caso 2a.....	65
Figura 25: caso 2b.....	66
Figura 26: caso 3.....	67
Figura 27: caso 3a.....	67
Figura 28: caso 3b.....	68

Figura 29: diagrama dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial ensaiado.....	70
Figura 30: hierarquia de oscilação dos coeficientes de pressão interna ensaiados e calculados.....	73
Figura 31: sobreposição dos efeitos da pressão externa tanto para o caso analítico como para o caso experimental (em termos de coeficientes).....	74
Figura 32: detalhe da possível alteração no trecho C, dividindo em duas partes.....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: parâmetros meteorológicos.....	23
Quadro 2: fator S_2	24
Quadro 3: fator S_3	25
Quadro 4: coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular.....	30
Quadro 5: coeficientes de pressão interna – (casos a e b).....	48
Quadro 6: coeficientes de pressão interna – (caso c).....	49
Quadro 7: dimensões e proporções do pavilhão estudado.....	52
Quadro 8: características das aberturas experimentadas.....	54
Quadro 9: proporção em relação à maior abertura do oitão, localização e tipo de cada abertura para os nove casos estudados.....	57
Quadro 10: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 1.....	62
Quadro 11: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 1a.....	63
Quadro 12: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 1b.....	64
Quadro 13: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 2.....	64
Quadro 14: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 2a.....	65
Quadro 15: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 2b.....	66
Quadro 16: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 3.....	67
Quadro 17: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 3a.....	68
Quadro 18: cálculo dos coeficientes de pressão interna caso 3b.....	69
Quadro 19: coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente.....	71
Quadro 20: relação entre os coeficientes de pressão interna calculados e ensaiados.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.2.2 Objetivos Secundários	14
2.3 HIPÓTESE.....	15
2.4 PRESSUPOSTO.....	15
2.5 DELIMITAÇÕES.....	15
2.6 LIMITAÇÕES.....	15
2.7 DELINEAMENTO.....	16
3 VELOCIDADE DO VENTO	18
3.1 VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO.....	18
3.1.1 Os Fatores de Ajuste da Velocidade Básica do Vento V_0	19
3.1.1.1 Fator Topográfico S_1	19
3.1.1.2 Fator Topográfico S_2	21
3.1.1.2.1 <i>Rugosidade do Terreno</i>	21
3.1.1.2.2 <i>Dimensões da Edificação</i>	22
3.1.1.2.3 <i>Altura Sobre o Terreno</i>	23
3.1.1.3 Fator Estatístico S_3	24
3.2 DETERMINAÇÃO SIMPLIFICADA DA VELOCIDADE DO VENTO.....	25
3.3 PRESSÃO DINÂMICA.....	26
3.3.1 Coeficientes de Pressão	26
3.3.2 Coeficientes de Forma	28
3.3.3 Coeficientes de Força	29
3.4 COEFICIENTES DE ARRASTO E REGIMES DE ESCOAMENTO: ALTA TURBULÊNCIA E BAIXA TURBULÊNCIA.....	31
3.5 CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA SEGUNDO A NBR 6123/1988.....	32
3.6 MÉTODO EXPEDITO PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PRESSÃO INTERNA.....	36
4 TÚNEIS DE VENTO E PERMEABILIDADE	38
4.1 HISTÓRICO.....	38
4.2 OS ENSAIOS EM TÚNEIS DE VENTO.....	40

4.3 TIPOS DE ESTRUTURAS.....	41
4.4 PERMEABILIDADE.....	41
4.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ABERTURAS.....	43
4.6 ÍNDICE DE PERMEABILIDADE E ABERTURA DOMINANTE.....	44
4.7 COEFICIENTES DE PRESSÃO INTERNA.....	47
4.8 INFLUÊNCIA DO TIPO DE ABERTURA NAS PRESSÕES INTERNAS.....	50
5 PAVILHÃO INDUSTRIAL ESTUDADO.....	51
5.1 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	51
5.2 DIMENSÕES.....	52
5.3 FECHAMENTOS LATERAIS E DE OITÃO.....	53
5.4 CASOS ESTUDADOS.....	55
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	58
6.1 RESULTADOS ANALÍTICOS.....	58
6.1.1 Coeficientes de Pressão Externa.....	58
6.1.2 Cálculo da Pressão Interna.....	60
6.1.2.1 Caso 1.....	62
6.1.2.2 Caso 1a.....	62
6.1.2.3 Caso 1b.....	63
6.1.2.4 Caso 2.....	64
6.1.2.5 Caso 2a.....	65
6.1.2.6 Caso 2b.....	66
6.1.2.7 Caso 3.....	67
6.1.2.8 Caso 3a.....	67
6.1.2.9 Caso 3b.....	68
6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	69
6.2.1 Coeficientes de Pressão Externa.....	69
6.2.2 Coeficientes de Pressão Interna.....	70
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS.....	76
ANEXO A	77
ANEXO B	79

1 INTRODUÇÃO

O vento não é um problema em construções baixas e pesadas, executadas com paredes espessas, porém, em estruturas esbeltas passa a ser uma das ações mais importantes a considerar no projeto de estruturas. As considerações para determinação das forças devidas ao vento são regidas e calculadas de acordo com a NBR 6123/1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações –.

Os fechamentos laterais de uma edificação exercem grande influência no desempenho aerodinâmico do prédio. A característica da permeabilidade deve-se à presença de diversas aberturas na edificação, tais como: juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhas e telhados, vão abertos de portas e janelas, chaminés, lanternins, etc.

A NBR 6123/1988, apresenta para edificações com paredes internas permeáveis, valores que podem ser adotados para o coeficiente de pressão interna. É justamente nesse aspecto que este trabalho centra seu foco, o de determinar a relação que existe entre as orientações da NBR 6123/1988 e os ensaios realizados em túnel de vento na determinação da permeabilidade real dos fechamentos das edificações. Com isso, pretende-se fazer a verificação da aplicabilidade das orientações da Norma utilizada atualmente. Também é um dos objetivos do trabalho, evidenciar a eventual diferença oriunda dessa aproximação que é sugerida.

Muitas vezes, o dimensionamento estrutural de pavilhões industriais é menosprezado por se tratar de uma edificação leve, sem divisórias internas e em geral o único carregamento axial permanente é a cobertura existente sobre o pavilhão, A carga de vento que irá atuar sobre o pavilhão exercerá pressões sobre as faces externas do pavilhão, e, conseqüentemente, haverá pressões nas faces internas.

Neste primeiro capítulo é feita a introdução do trabalho e, no segundo, apresenta-se o método de pesquisa adotado.

No capítulo 3 deste trabalho, aborda-se a bibliografia referente à velocidade básica do vento, e seus coeficientes de ajuste para sua transformação em velocidade característica. Neste mesmo

capítulo, desenvolvem-se também os assuntos de pressão dinâmica do vento, apresentando os coeficientes de pressão, de forma e de força. Também faz-se uma abordagem sobre os coeficientes de arrasto e os regimes de escoamento (alta e baixa turbulência). No final deste capítulo, mostra-se o cálculo da pressão interna nas edificações segundo a NBR 6123/88.

No capítulo 4, abordam-se o histórico e os mecanismos dos ensaios em túneis de vento, mostrando desde os primeiros experimentos até os ensaios realizados atualmente. Na sequência, apresentam-se os tipos de estruturas, o conceito de permeabilidade, a classificação das aberturas, o índice de permeabilidade, a abertura dominante, os coeficientes de pressão interna e, por fim, uma abordagem sobre a influência do tipo de abertura nas pressões internas.

O capítulo 5 versa sobre o método de trabalho utilizado, as características físicas do pavilhão estudado, como suas dimensões. Também neste capítulo apresentam-se os fechamentos laterais e de oitão utilizados nos ensaios e os casos e combinações considerados.

No capítulo 6, são apresentadas as resoluções analíticas e experimentais tanto para os coeficientes de pressão externos quanto internos. Os resultados são analisados caso a caso.

No capítulo 7 é realizado um comparativo a fim de evidenciar as diferenças entre os casos analítico e experimental.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: os valores para a permeabilidade dos fechamentos laterais calculados conforme a NBR 6123/1988 e obtidos nos ensaios em túnel de vento sofrem influência do tipo (forma/geometria) e localização da abertura considerada?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a determinação da influência do tipo e localização de aberturas nas pressões internas de pavilhões industriais.

2.2.2 Objetivo secundário

Os objetivos secundários do trabalho são os seguintes:

- a) carregamento conforme a NBR 6123/1988 para pressões internas e externas;
- b) verificação do carregamento pelo ensaio em túnel de vento;
- c) verificação da aplicabilidade dos valores calculados conforme a NBR 6123/1988 para a permeabilidade dos fechamentos laterais de pavilhões industriais.

2.3 HIPÓTESE

A diferença verificada entre os coeficientes calculados pela Norma e os coeficientes obtidos através de ensaios indica que não só a área, mas também o tipo e a localização de aberturas constante nas faces dos pavilhões industriais, exercem influência nas pressões internas destas edificações.

2.4 PRESSUPOSTO

Os ensaios em túnel de vento representam com muito bom grau de precisão o que ocorre efetivamente com as edificações frente aos esforços devidos ao vento.

2.5 DELIMITAÇÕES

O domínio da pesquisa foi delimitado ao estudo de um modelo de pavilhão industrial.

2.6 LIMITAÇÕES

A limitação deste trabalho é que somente estudaram-se os coeficientes de pressão externa e interna médios, o ângulo de incidência do vento unicamente de zero graus e três tipos de fechamentos laterais e de oitão.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido conforme as etapas apresentadas abaixo, como ilustrado na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) conforme a NBR 6123/1988, determinou-se o carregamento de pressões externas e internas em termos de coeficientes;
- c) foram obtidos os resultados dos ensaios do modelo de pavilhão industrial em túnel de vento, oriundos da dissertação de mestrado de Acir Mércio Loredo-Souza.
- d) análise dos resultados e conclusões.

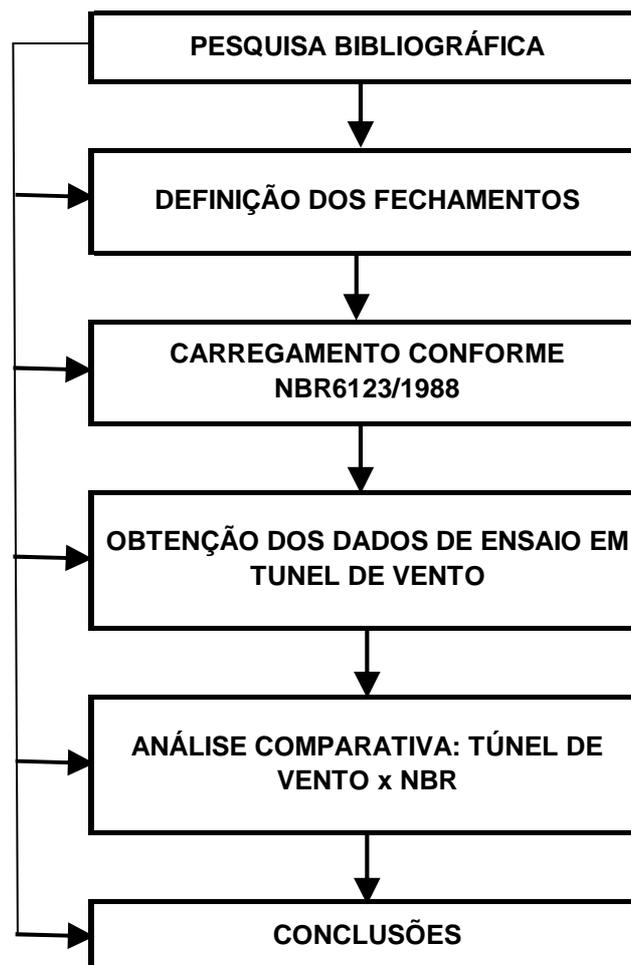


Figura 1: diagrama das etapas do trabalho

Na pesquisa bibliográfica foi abordado o material que versasse sobre pressões internas e externas. O foco principal do trabalho são pressões internas, mas as pressões externas também foram amplamente estudadas devido ao fato de as pressões internas serem calculadas a partir das externas.

O pavilhão considerado no trabalho foi carregado, em termos de coeficientes, segundo orientações da NBR 6123/88, tanto em termos de coeficientes internos como externos. Foram calculados os coeficientes para cada caso considerado.

Após foram estudados os levantamentos de ensaios realizados para o modelo em túnel de vento.

Em seguida, foi efetuada uma análise comparativa entre os métodos analíticos e experimentais, visando evidenciar as diferenças entre os dois métodos e a influência exercida pelo tipo de abertura nas pressões internas.

3 VELOCIDADE DO VENTO

Neste capítulo são apresentados os conceitos de velocidade do vento, seus fatores de ajuste, a pressão exercida pelo vento, os coeficientes de pressão, de forma e de força, e os tipos de regime de escoamento.

3.1 A VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO

A velocidade básica do vento V_0 é a velocidade de uma rajada de três segundos, com período de retorno estimado de 50 anos, ou seja, esta velocidade poderá ser igualada ou excedida uma vez a cada 50 anos (em média), a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano. A figura 2 mostra o gráfico das isopletas, ou seja, linhas de mesma velocidade básica do vento no Brasil, em intervalos de 5m/s.

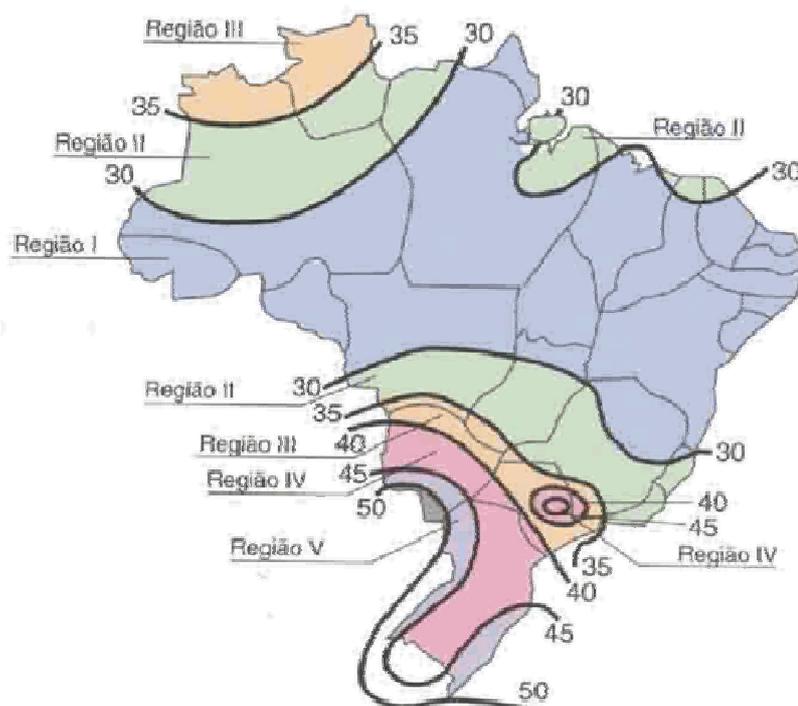


Figura 2: isopletas da velocidade básica V_0 (m/s)
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

A NBR 6123/1988 também indica que, em caso de dúvida com relação à seleção da velocidade básica do vento, V_0 , ou em casos de obras de excepcional importância, recomenda-se um estudo específico para a determinação de V_0 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6).

3.1.1 Os Fatores de Ajuste da Velocidade Básica do Vento V_0

A velocidade básica do vento deve sofrer ajustes para que seja transformada na velocidade característica do vento V_k . O objetivo deste ajuste é adequar a velocidade básica do vento V_0 ao local onde a estrutura será construída. De acordo com a NBR 6123/1988, três fatores são considerados, conforme apresentado a seguir.

3.1.1.1 Fator topográfico S_1

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do local da edificação. Para terreno plano ou fracamente acidentado, taludes e morros, utiliza-se o fator $S_1 = 1,0$. Para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, pode ser adotado o fator $S_1 = 0,9$. Já para taludes e morros alongados, nos quais pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na figura 3, teremos que para os pontos A (morros) e A e C (taludes), assume-se o fator $S_1 = 1,0$. No ponto B, com $\theta \leq 3^\circ$, $S_1 = 1,0$. Já para $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$, determina-se o valor de S_1 conforme a expressão 1:

$$S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) \cdot \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1 \quad (\text{expressão 1})$$

Onde:

z = altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro.

Para $\theta \geq 45^\circ$, determina-se o valor de S_1 segundo a expressão 2.

$$S_1 = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) \cdot 0,31 \geq 1 \quad (\text{expressão 2})$$

Onde:

z = altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro.

Para o caso de $3^\circ \leq \theta \leq 6^\circ$ e $17^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, deve-se interpolar linearmente. Assim, na figura 3, entre A e B e entre B e C o fator S_1 é obtido por interpolação linear.

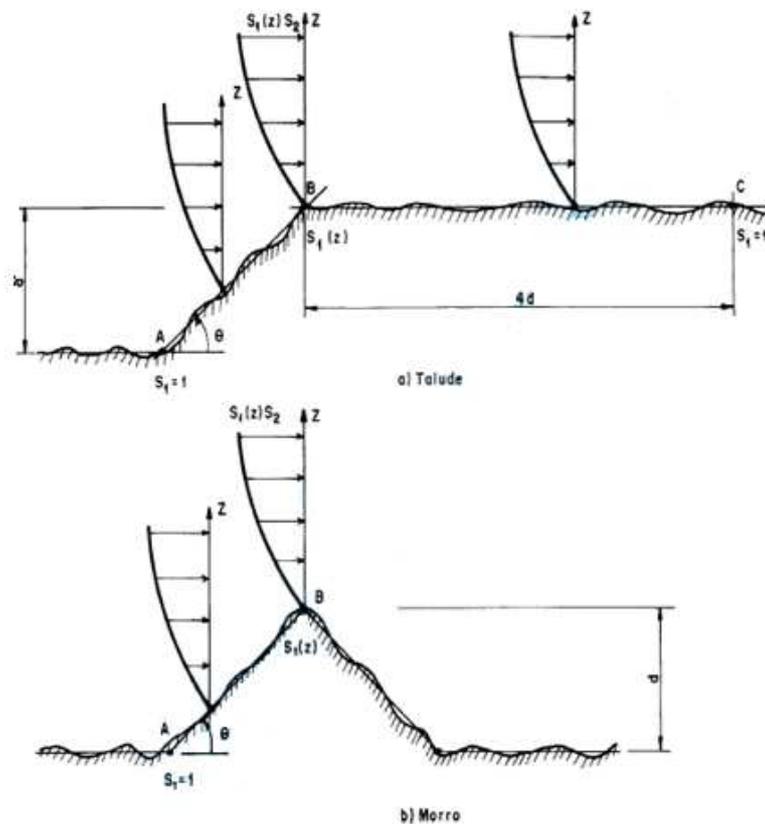


Figura 3: fator topográfico $S_1(z)$ / NBR 6123/88
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

3.1.1.2 Fator topográfico S_2

O fator topográfico S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Em ventos fortes em estabilidade neutra a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno. Este aumento depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação, pois edificações pequenas e elementos de edificações são mais afetados por rajadas de curta duração do que grandes edificações. Para estas é mais adequado considerar o vento médio calculado com um intervalo de tempo maior.

3.1.1.2.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias, as quais são discriminadas a seguir:

- a) categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos,
 - mar calmo;
 - lagos e rios;
 - pântanos sem vegetação;
- b) categoria II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos,
 - zonas costeiras planas;
 - pântanos com vegetação rala;
 - campos de aviação;
 - pradarias e charnecas;
 - fazendas sem sebes ou muros;
- c) categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos,
 - granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
 - fazendas com sebes ou muros;

- subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;
- d) categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos,
 - 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;
- e) categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos,
 - florestas com árvores altas de copas isoladas;
 - centros de grandes cidades;
 - complexos industriais bem desenvolvidos.

3.1.1.2.2 Dimensões da edificação

As edificações são, ainda, classificadas de acordo com suas dimensões. As rajadas de vento medidas com intervalos de três segundos, envolvem convenientemente obstáculos de até vinte metros na direção do vento médio. Portanto, quanto maior o intervalo de tempo usado no cálculo da velocidade média, tanto maior a distância abrangida pela rajada. Nesse sentido, foram escolhidas as seguintes classes de edificações, partes de edificações e seus elementos, com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de, respectivamente, 3, 5 e 10 segundos:

- a) 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 20 metros;
- b) classe B: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros;
- c) classe C: toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros.

3.1.1.2.3 Altura sobre o terreno

O fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura z acima do nível geral do terreno é obtido pela expressão 3:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (\text{expressão 3})$$

Sendo que o fator de rajada F_r é sempre o correspondente à categoria II. A expressão acima é aplicável até a altura de z_g , que define o contorno superior da camada limite atmosférica. Os parâmetros que permitem determinar S_2 para as cinco categorias da NBR 6123/1988 são apresentados no quadro 1.

Categoria	Z_g (m)	Parâmetro	CLASSES		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,07	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,09	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,100	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Quadro 1: parâmetros meteorológicos
(adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9)

Os valores de S_2 para as diversas categorias de rugosidade do terreno e classes de dimensões das edificações definidos na NBR6123/1988 são exibidos no quadro 2.

Z (m)	CATEGORIA														
	I Classe			II Classe			III Classe			IV Classe			V 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

Quadro 2: fator S_2 (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

3.1.1.3 Fator estatístico S_3

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido, vida útil da edificação e sua taxa de ocupação humana. Quanto menos importante for a edificação, mais brando será o coeficiente S_3 . Os valores de S_3 são apresentados no quadro 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

Quadro 3: fator S₃ (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

A velocidade básica do vento V₀ é então multiplicada pelos fatores de ajuste S₁, S₂ e S₃ e obtém-se a velocidade característica do vento V_k no local onde está inserida a edificação em estudo:

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{expressão 4})$$

3.2 DETERMINAÇÃO SIMPLIFICADA DA VELOCIDADE DO VENTO

De acordo com Sachs (1978, p. 51), a rugosidade do terreno retarda o vento junto ao solo, ou seja, as camadas inferiores de ar retardam as superiores, até o ponto em que as forças de retardo sejam levadas a zero, causando um gradiente de velocidades que vai de zero na superfície até a velocidade da massa de ar. A esta altura, onde não existe mais o efeito da superfície, é dado o nome de altura gradiente. Uma expressão empírica que correlaciona as velocidades dos ventos à altura em relação ao solo é a seguinte:

$$\frac{V_z}{V_{z,0}} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^p \quad (\text{expressão 5})$$

Onde:

V_z = velocidade à altura desejada;

$V_{z,0}$ = velocidade na altura de referência, geralmente à 10 metros do solo;

p = valor representativo da rugosidade do terreno.

3.3 PRESSÃO DINÂMICA E COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 18), a velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica pela seguinte expressão:

$$q = 0,613 \cdot V_K^2 \quad (\text{expressão 6})$$

Onde (unidades SI):

q em N/m^2 ;

V_K em m/s .

3.3.1 Coeficientes de Pressão

Como a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas e internas. De acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19), entende-se por pressão efetiva, Δp , em um ponto da superfície de uma edificação, ao valor definido por:

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i \quad (\text{expressão 7})$$

Onde:

Δp_e – pressão efetiva externa;

Δp_i – pressão efetiva interna.

Portanto:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi}) \cdot q \quad (\text{expressão 8})$$

Sendo:

C_{pe} – coeficiente de pressão externa:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad (\text{expressão 9})$$

C_{pi} – coeficiente de pressão interna:

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad (\text{expressão 10})$$

Valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepressões e valores negativos correspondem a sucções. Ou seja, um valor positivo para Δp indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa e um valor negativo para Δp indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa.

3.3.2 Coeficientes de Forma

A força do vento sobre um elemento plano da edificação de área A atua sempre em direção perpendicular ao mesmo, sendo dada por:

$$F = F_e - F_i \quad (\text{expressão 11})$$

Onde:

F_e – força externa à edificação, agindo na superfície plana de área A ;

F_i – força interna à edificação, agindo na superfície plana de área A .

Portanto:

$$F = (C_e - C_i) \cdot q \cdot A \quad (\text{expressão 12})$$

Sendo:

C_e – coeficiente de forma externo:

$$C_e = \frac{F_e}{q} \cdot A \quad (\text{expressão 13})$$

C_i – coeficiente de forma interno:

$$C_i = \frac{F_i}{q} \cdot A \quad (\text{expressão 14})$$

Valores positivos dos coeficientes de forma externo e interno correspondem a sobrepressões e valores negativos correspondem a sucções. Um valor positivo para F indica que esta força

atua para o interior e um valor negativo indica que esta força atua para o exterior da edificação. Para os casos previstos na Norma, a pressão interna é considerada uniformemente distribuída no interior da edificação. Conseqüentemente, em superfícies internas planas $c_{pi} = c_i$ (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 19).

3.3.3 Coeficientes de Força

A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela, F_g , é obtida pela soma vetorial das forças do vento que atuam nessa parte ou nessa edificação. A componente da força global na direção do vento, força de arrasto F_a , é obtida por:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (\text{expressão 15})$$

Onde:

C_a – coeficiente de arrasto;

A_e – área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (**área de sombra**).

De um modo geral, uma componente qualquer da força global é obtida por:

$$F = C_f \cdot q \cdot A \quad (\text{expressão 16})$$

Onde:

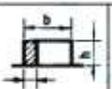
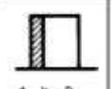
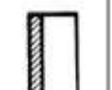
C_f – coeficiente de força, especificado em cada caso: C_x , C_y , etc.

A – área de referência, especificada em cada caso.

Os coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular são dados no quadro 4 e o ângulo de incidência do vento é dado pelas representações na figura 4.

Algumas considerações devem ser feitas para os casos não previstos no quadro 4:

- para a/b entre $3/2$ e 2 , interpolar linearmente;
- para vento a 0° , nas partes A_3 e B_3 o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores:
 - para $a/b = 1$: mesmo das partes A_2 e B_2 ;
 - para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$;
 - para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente;
- para cada uma das duas incidências do vento (0° ou 90°), o coeficiente de pressão médio externo c_{pe} 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;
- para determinar o coeficiente de arrasto, C_a , devem ser usados os gráficos dos anexos A (vento de baixa turbulência) ou do anexo B (vento de alta turbulência).

Altura relativa		Valores de C_e para								c_{pe} médio
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	$0,2b$ ou h (o menor dos dois)	-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
 $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	$0,2b$ ou h (o menor dos dois)	-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
 $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	$0,2b$ ou h (o menor dos dois)	-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

Quadro 4: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes de edificações de planta retangular
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14)

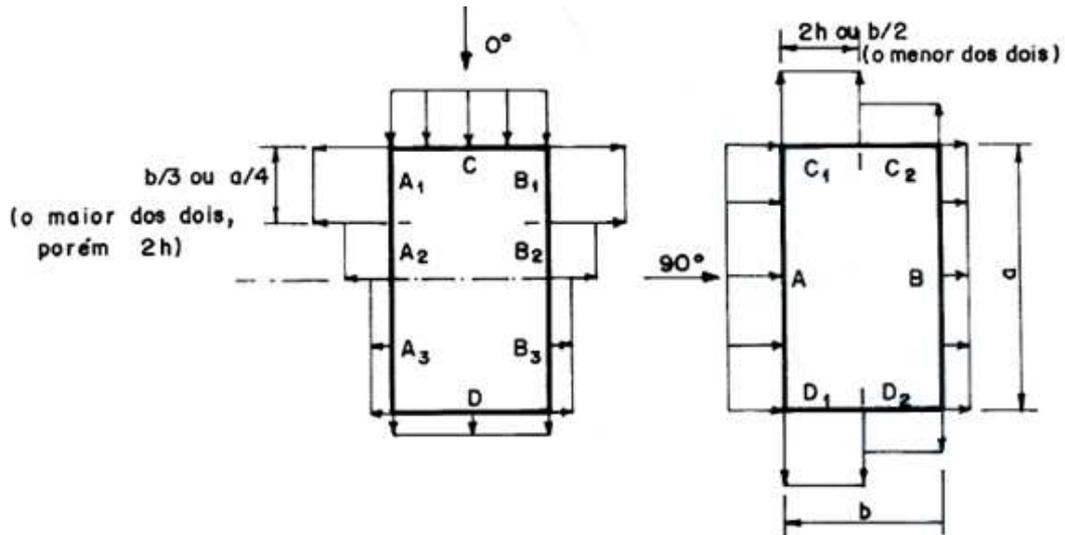


Figura 4: ângulo de incidência do vento na edificação
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14)

3.4 COEFICIENTES DE ARRASTO E REGIMES DE ESCOAMENTO: ALTA TURBULÊNCIA E BAIXA TURBULÊNCIA

O procedimento para a determinação dos coeficientes de arrasto, tanto na direção X como Y é o seguinte:

- a) cálculo das relações l_1/l_2 e h/l_1 para as direções X e Y, sendo,
 - 11: dimensão, em planta, da fachada perpendicular à direção do vento para cada caso (como mostrado nos anexos A e B);
 - 12: dimensão, em planta, da fachada paralela à direção do vento para cada caso (como mostrado nos anexos A e B);
 - h: altura total da edificação, em relação ao nível do solo;
- b) determinação do grau de turbulência do vento: alta turbulência ou de baixa turbulência, segundo os critérios apresentados;
- c) entrada com os dados no ábaco correspondente e obtenção dos coeficientes de arrasto.

Quanto a definição de alta ou baixa turbulência, de acordo com os critérios fixados na NBR 6123 nos itens 6.5.1 e 6.5.3, pode-se classificar conforme descrito abaixo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p.21):

6.5.1 Em geral, os coeficientes aerodinâmicos dados nesta Norma foram obtidos de testes nos quais o fluxo de ar era moderadamente suave, aproximadamente do tipo de vento que aparece em campo aberto e plano (vento de baixa turbulência). No vento de alta turbulência que aparece em grandes cidades, há diminuição de sucção na parede de sotavento de edificações paralelepípedicas, com conseqüente diminuição dos respectivos coeficientes, exceto para edificações com uma relação profundidade/largura de 1/3 ou menos.

6.5.3 Uma edificação pode ser considerada em vento de alta turbulência quando sua altura não excede duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas, na direção e no sentido do vento incidente, a uma distância mínima de:

- 500 m, para uma edificação de até 40 m de altura;
- 1000 m, para uma edificação de até 55 m de altura;
- 2000 m, para uma edificação de até 70m de altura;
- 3000 m, para uma edificação de até 80 m de altura.

3.5 CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA SEGUNDO A NBR 6123/1988

Para o cálculo da pressão interna, a vazão de ar por uma pequena abertura de área A é dada por (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 47):

$$Q = K \cdot A \cdot \rho \cdot V \quad (\text{expressão 17})$$

Onde:

K – coeficiente de vazão;

V – velocidade do ar na abertura:

$$V = \sqrt{2 \cdot |\Delta p_e - \Delta p_i|} / \rho \quad (\text{expressão 18})$$

ρ – massa específica do ar, considerada constante (isto é, o ar é considerado incompressível).

Para um número n de aberturas, uma vez estabelecido o equilíbrio, a massa de ar que entra na edificação será igual a que sai. Isto é:

$$Q = 0 \quad (\text{expressão 19})$$

Conforme 18 e 19:

$$\sum_1^n K \cdot A \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot |\Delta p_e - \Delta p_i| / \rho} = 0 \quad (\text{expressão 20})$$

Com boa aproximação K pode ser considerado constante. Lembrando que:

$$\Delta p_e = c_{pe} \cdot q \quad (\text{expressão 21})$$

$$\Delta p_i = c_{pi} \cdot q \quad (\text{expressão 22})$$

E então, a expressão 20 resulta em:

$$\sum_1^n \pm A \cdot \sqrt{|c_{pe} - c_{pi}|} = 0 \quad (\text{expressão 23})$$

A experiência mostra que a expressão acima pode ser aplicada a aberturas maiores (janelas, portas, portões, ventilações, permeabilidade disseminada, etc.), desde que sejam considerados coeficientes de pressão médios, que serão designados por c_e^* e c_i^* , tanto podem ser coeficientes de forma (c_e e c_i) como média dos coeficientes de pressão, fornecidos pela Norma ou obtidos em outras fontes. Com esta generalização, a equação 23 resulta em:

$$\sum_1^n \pm A \cdot \sqrt{|c_e^* - c_i^*|} = 0 \quad (\text{expressão 24})$$

Esta é a fórmula usual para cálculo da pressão interna em edificações. A raiz é considerada positiva para todos os termos que correspondam a aberturas com entrada de ar ($c_e^* > c_i^*$) e negativa para aberturas com saída de ar ($c_e^* < c_i^*$). Isto é, a raiz terá o mesmo sinal de $c_e^* - c_i^*$. O cálculo pode ser feito por aproximações sucessivas, arbitrando-se valores para c_i^* , procedimento este que está detalhado no item seguinte.

Encontra-se, na literatura especializada, mais de uma fórmula para o cálculo da pressão interna em uma edificação. A mais usual é aquela em que o fluxo de ar através de um orifício ou abertura é expresso por uma equação da forma:

$$Q = K \cdot A \cdot (\Delta p)^n \quad (\text{expressão 25})$$

Onde:

Q – vazão volumétrica de ar ($\rho = \text{cte}$);

K – coeficiente de vazão;

A – área do orifício ou abertura;

$$\Delta p = |\Delta p_e - \Delta p_i|;$$

n – expoente do escoamento (adimensional).

O expoente do escoamento n pode variar entre 0,5, para escoamento turbulento através de um orifício de bordas vivas, a 1,0 para escoamento laminar através de fendas muito estreitas. Medidas em construções reais indicam valores entre 0,5 e 0,8 e isto se deve ao fato de que a porosidade de uma edificação normal é geralmente formada por uma mistura de casos de escoamentos laminares e turbulentos. Entretanto, três são os valores mais utilizados:

- a) $n = 0,5$: este é o valor **clássico**, o valor que vem sendo utilizado há mais tempo. Alguns autores justificam o emprego de $n=0,5$ como sendo o valor limite que conduz a um carregamento mais nocivo, sendo, por isso, preferível para o cálculo;
- b) $n = 0,65$: é um valor mais sensato, pois evita os perigos dos extremos, além de enquadrar-se entre valores medidos em construções reais. É empregado por diversos pesquisadores, e citado em vários trabalhos, conforme Cook (1990 apud BLESSMANN, 1991), como sendo um valor mais real, e também por Davenport (1975);
- c) $n = 1,0$: é o valor sugerido por Davenport (1975), que simplifica o problema considerando que a variação de K é tão grande de construção para construção (mesmo seus valores médios), que uma lei mais simples, linear, não irá causar um erro significativo na determinação do coeficiente de pressão interna (P.I.).

Para o coeficiente de vazão K , a disparidade é ainda maior. Seu valor varia com a posição da passagem de ar e depende da forma e das condições do orifício. O que se faz na prática é considerar K constante, fazendo com que o expoente n represente o efeito dos diversos tipos de abertura e escoamento através das mesmas. Sob condições de regime permanente, o ar que entra na edificação deve ser igual ao ar que sai da mesma (equação da continuidade). Então, considerando, como é usual, K constante em toda a edificação, tem-se:

$$\sum_{j=1}^N Q_j = \sum_{j=1}^n \left[\pm A_j \cdot \left(|\Delta p_{e,j} - \Delta p_i| \right)^n \right] = 0 \quad (\text{expressão 26})$$

Sendo A_j a soma das áreas dos pequenos orifícios e/ou fendas existentes em uma zona j da construção para a qual possa ser considerado um valor médio, representativo das pressões externas nesta zona (a qual pode ser uma face inteira da construção); os sinais $+$ e $-$ necessários para distinguir entre o ar que entra ($+$) e o ar que sai ($-$) da edificação. N é o número de zonas em que foi dividida a superfície externa da construção, cada uma delas com um $\Delta p_{e,j}$ representativo das pressões atuantes nesta zona.

Shaw (1981, p. 44-46) obteve experimentalmente os seguintes valores para K , considerando $n = 0,65$:

- a) Edifícios altos: $K = 0,018 \pm 0,010 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$

- b) Escolas: $K = 0,043 \pm 0,018 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$
- c) Supermercados: $K = 0,081 \pm 0,056 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$

Quando a pressão dinâmica de referência, q , for única ou assim puder ser considerada, pode-se expressar as pressões externas e internas na forma de coeficientes e a expressão 26 pode então facilmente ser resolvida por um método iterativo, através de técnicas numéricas. Uma vez adotado o expoente n adequado, a incógnita se torna o coeficiente de pressão interna ou de forma interna, já que A_j é um dado da edificação e $c_{pe,j}$ ou $C_{e,j}$ podem facilmente ser encontrados na Norma. Desta forma, pode-se ter um índice de permeabilidade da edificação até o limite em que este não altere o campo de pressões externas que existe na mesma edificação fechada. Stathopoulos (1980 apud LOREDO-SOUZA, 1993) e Hold (1980 apud LOREDO-SOUZA, 1993); indicam valores de até 3,0%; Vickery (1981, apud LOREDO-SOUZA, 1993) estima este valor entre 10% e 20%. A Norma Brasileira indica como valor limite para utilização da fórmula um índice de permeabilidade das paredes ou águas da cobertura de 30%.

Do que foi exposto acima, pode-se dizer que c_{pi} será igual a C_i e $c_{pe,j}$ poderá ser substituído pelo valor de $C_{e,j}$ na superfície correspondente à abertura j da edificação (portas, janelas, ventilações, etc). Então:

$$\sum_{j=1}^N \left[\pm A_j \cdot \left(C_{e,j} - C_i \right)^n \right] = 0 \quad (\text{expressão 27})$$

3.6 MÉTODO EXPEDITO PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE PRESSÃO INTERNA

Para o cálculo da pressão interna, também pode ser utilizado um método expedito, que permite estimar, com certo grau de precisão, o coeficiente interno da edificação. Este método caracteriza-se por ser de fácil e rápida aplicação. O método baseia-se em uma média

ponderada dos coeficientes de pressão externos para a obtenção dos coeficientes internos. A expressão 28 demonstra o procedimento (informação verbal)¹:

$$C_i = \frac{C_{e1} \cdot A_1 + C_{e2} \cdot A_2 + C_{en} \cdot A_n}{A_1 + A_2 + A_n} \quad (\text{expressão 28})$$

Onde:

C_{e1} – coeficiente de pressão externa correspondente à abertura 1;

C_{e2} – coeficiente de pressão externa correspondente à abertura 2;

C_{en} – coeficiente de pressão externa correspondente à n-ésima abertura;

A_1 – área da abertura 1;

A_2 – área da abertura 2;

A_n – área da n-ésima abertura.

O mesmo método pode ser utilizado para uma estimativa do coeficiente de pressão interno, porém, indica-se que este método seja utilizado apenas para obter-se o primeiro valor a ser inserido na expressão 24, ou seja, o primeiro valor a ser inserido na primeira iteração da expressão 24. Isto faz com que a expressão 24, que tem uma alta instabilidade numérica, convirja mais rapidamente para o valor final do coeficiente de pressão interna.

¹ Método empírico indicado pelo Prof. Acir Mércio Loredo-Souza

4 TÚNEIS DE VENTO E PERMEABILIDADE

Neste capítulo são apresentados o histórico e os mecanismos de ensaios em túneis de vento, os tipos de estruturas, a permeabilidade, a classificação das aberturas, o índice de permeabilidade e a abertura dominante e a influência do tipo de abertura nas pressões internas.

4.1 HISTÓRICO

Os primeiros experimentos realizados para a determinação de esforços sobre sólidos foram desenvolvidos na Universidade de Melbourne, na Austrália, por Kernot e Mann, entre os anos de 1891 e 1894. Irminger, no ano de 1893, engenheiro dinamarquês, fez experimentos em um túnel de vento montado em uma chaminé, onde utilizava a corrente de ar que subia pela mesma como fonte de seus ventos. Este túnel tinha uma seção de 11,5 x 23,0 cm onde eram feitos os ensaios. Eiffel fez seus primeiros ensaios no final do século XIX, onde deixava cair os modelos em queda livre, conduzidos por um cabo guia de uma altura de cerca de 116 m. Através da velocidade final determinava a força de arrasto exercida sobre os modelos (BLESSMANN, 1990, p. 110).

Os primeiros túneis foram desenvolvidos com fins aeronáuticos, onde o vento é o mais uniforme e laminar possível, já que esta é a situação em que se encontrarão os aviões quando voando em altitude. Muitas tabelas utilizadas hoje foram obtidas através de ensaios realizados em túneis de vento aeronáuticos. Com o tempo, notou-se que os resultados obtidos nesses túneis não tinham grande fidelidade com a realidade das obras de edificações, pois não simulavam as condições de turbulência e a variação de velocidades existentes na camada limite atmosférica. Assim, foram construídos os primeiros túneis de vento de camada limite atmosférica, que faziam a simulação das principais características dos ventos que agem sobre as edificações (SIMIU; SCANLAN, [ca. 1986]).

Pode-se notar a diferença entre os dois tipos de simulação do vento a partir das figuras 5 e 6.

Observando as figuras, nota-se que as distribuições de pressão no modelo ensaiado e submetido aos dois tipos de ensaios são completamente diferentes, devido às diferenças das características dos ventos incidentes. Fica claro ao se analisar o modelo submetido ao vento laminar constante do túnel de vento aeronáutico (figura 5), que a força exercida pelo vento é muito maior neste caso. Vê-se uma grande região com coeficientes de pressão de $+0,9$ na face voltada para o vento e pressões que variam de $-0,9$ a $-0,5$ na face contrária ao vento.

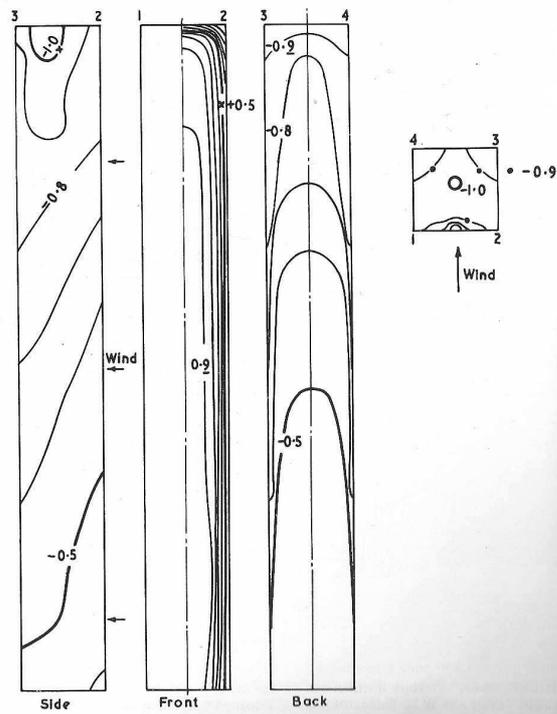


Figura 5: distribuição de pressões em modelo de edifício alto em túnel de vento aeronáutico (SIMIU et al. [ca.1985], p. 164)

Já no modelo carregado com o vento simulando a camada limite atmosférica (figura 6), continua-se tendo uma região na face voltada para o vento com coeficiente de pressão $+0,9$, mas de área muito menor, situada na região superior do modelo. No restante os coeficientes decaem devido às diferenças de velocidades existentes no perfil aplicado. Na face oposta ao vento se tem um coeficiente de pressão médio de $-0,5$, que leva à conclusão de que o melhor modelo a ser adotado é a simulação da camada limite, que gera esforços mais realistas, quando comparados com medições reais, e menores nas edificações desta categoria, e conseqüentemente projetos mais eficientes e baratos, apesar de a utilização de túnel de vento aeronáutico gerar resultados a favor da segurança, mas em contrapartida contra a economia.

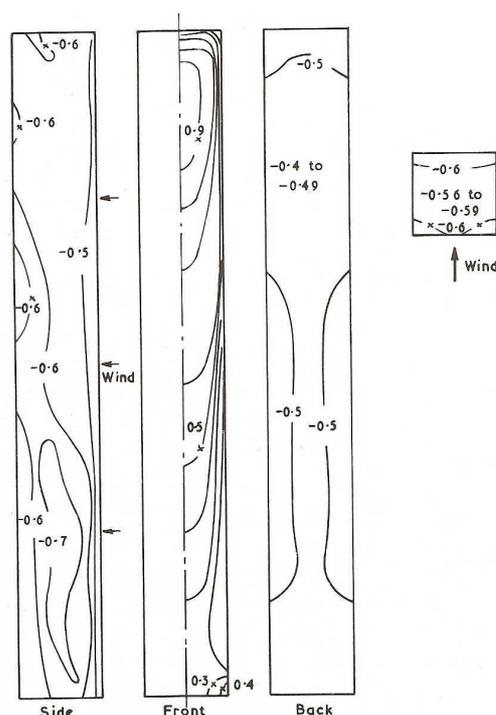


Figura 6: distribuição de pressões em modelo de edifício alto em túnel de vento de camada limite atmosférica (SIMIU et al. [ca.1985], p. 165).

4.2 OS ENSAIOS EM TÚNEIS DE VENTO

O método de ensaios em túneis de vento é um processo racional para determinar a resposta de uma estrutura à turbulência longitudinal do vento. Entretanto, quando há edificações ou obstáculos naturais de grande porte nas imediações a barlavento da estrutura em estudo, o espectro de energia das rajadas incidentes sofre influência sensível destes obstáculos. Além disso, a sotavento da estrutura as características da turbulência sofrem alterações importantes, causadas pela própria estrutura; em consequência aparecerão alterações nas respectivas pressões (BLESSMANN, 2005, p. 113).

Nos casos em que a edificação, por suas dimensões ou forma, causa perturbações importantes no escoamento, ou quando há uma perturbação notável causada por obstáculos vizinhos, é recomendado recorrer a ensaios em túnel de vento, no qual são simuladas as principais características do vento natural no local da obra (entre estas características está o espectro de energia das rajadas). Evidentemente o modelo deve ter características elásticas (semi-rígido, aeroelástico ou seccional, conforme o caso), de modo a permitir a determinação da resposta dinâmica da estrutura à excitação das rajadas. Também deverão ser reproduzidos os

obstáculos importantes existentes na vizinhança. Outra ressalva a fazer é que, para considerar a ação das rajadas laterais (e, em certos casos, verticais) será necessário um cálculo adicional, agora considerando o espectro destas componentes das rajadas (espectro lateral ou vertical). No túnel de vento, uma vez simulado corretamente o vento, todas as componentes serão sempre consideradas (BLESSMAN, 2005, p. 114).

4.3 TIPOS DE ESTRUTURAS

Segundo Davenport (1975 apud BLESSMANN, 2005), autor do método probabilístico, existem três graus de refinamento de cálculo, conforme a esbeltez, altura ou arrojo de formas, tendo-se, portanto, estruturas:

- a) estruturas em forma de bloco, com menos de dez pavimentos, de forma convencional e resistência simétrica ao vento, sendo utilizado o processo usual de cálculo, sem consideração das ações dinâmicas. Deve-se limitar as deflexões (por exemplo, uma deflexão nominal igual a 0,001 da altura);
- b) estruturas de forma convencional, de altura moderada, de dez a vinte pavimentos. Processo de cálculo: critérios de carga de vento baseados em análise estático-dinâmica simples, deflexão nominal e critérios de tensão, para cálculo.
- c) estruturas importantes de forma e altura não usuais, exigem testes em túnel de vento em condições realísticas de escoamento e estudo meteorológico das condições do vento no local da obra. Os critérios de cálculo baseados na avaliação do conforto humano, fadiga, limitações de tensões e deflexões máximas.

4.4 PERMEABILIDADE

Uma construção, para ser habitável, não pode ser estanque ao ar. Além da sufocação dos usuários, a diferença entre pressão interna e a externa durante a ocorrência dos ventos fortes pode romper alguma parte da construção: portas, janelas, painéis de revestimento de paredes e da cobertura, etc. Se, por exemplo, a pressão atmosférica baixar de 770mm (1027mbar) para 750mm (1000mbar) de mercúrio, e a construção for estanque, surgirá uma sobrepressão interna, em relação à pressão externa (que diminuiu de 20mm), de cerca de 2700 N/m² (BLESSMANN, 1991, p. 7).

Irminger e Nokkentved (1930 apud BLESSMANN, 1991), em seus estudos experimentais sobre a pressão interna em modelos de construções fechadas, com até 5,4% de aberturas em cada parede, chegaram às seguintes conclusões:

- a) em uma construção permeável ao ar a pressão interna pode ser substancialmente diferente da pressão atmosférica;
- b) a pressão interna é constante para uma dada velocidade do vento, independente do número e tamanho dos orifícios e de sua comunicação direta ou indireta com o ar externo, desde que eles sejam mais ou menos uniformemente distribuídos;
- c) a parede de barlavento é muito mais sensível a um aumento de percentagem de orifícios do que a de sotavento. Por exemplo,
 - aumento de 100% a sotavento: coeficiente de pressão interna não sofre alteração;
 - aumento de 50% a barlavento: coeficiente de pressão interna passou de -0,32 para -0,26;
 - aumento de 100% a barlavento: coeficiente de pressão interna passou de -0,32 para -0,20.

Segundo o item 6.2.1 da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12), se uma edificação for totalmente impermeável ao ar, a pressão no interior da mesma será invariável no tempo e independente da velocidade da corrente de ar externa. Porém, usualmente as paredes ou a cobertura de edificações consideradas como fechadas, em condições normais de serviço ou como consequência de acidentes, permitem a passagem do ar, modificando-se as condições ideais supostas nos ensaios.

A Norma também cita o seguinte, a respeito de permeabilidade:

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.

4.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ABERTURAS

Segundo Blessmann (1991, p. 7-8), no interior de uma construção não estanque ao ar, a pressão tem um valor intermediário entre os valores extremos das sobrepressões e sucções externas. Esta pressão interna depende da localização, tipo e área das aberturas, bem como das repartições internas e de seu grau de estanqueidade. Estas aberturas podem ser:

- a) normais: aberturas normalmente existentes: portas, janelas, goteiras, chaminés, lanternins, ventiladores, etc.;
- b) acidentais: por exemplo: um pico de sucção externa que arranca painéis de vedação de paredes ou cobertura; ruptura de vidros por sobrepressão externa ou por objetos lançados pelo vento ou por pessoas; abertura de portões, portas e janelas pela sobrepressão externa, etc.;
- c) construtivas: a ordem errônea de fechamento de paredes, oitões e coberturas (em certos casos também a colocação de vidros nas janelas) pode originar uma alta sobrepressão interna, que aumenta a força ascensional sobre o telhado, ao somar seus efeitos aos da sucção externa.

De um modo geral, afirma Blessmann (1991, p. 8), se a área das aberturas em uma parede for muito maior que a área das aberturas nas demais, a pressão interna se aproxima do valor médio existente externamente nesta parede, nas bordas das aberturas. Se, porém, a permeabilidade estiver disseminada mais ou menos uniformemente em toda a construção (incluindo, quando for o caso, a cobertura), aparecerá internamente uma sucção, pois a maior parte da superfície externa da construção encontrar-se-á submetida a sucções. No caso de uma única grande abertura, se ela, por suas dimensões, forma e situação, não alterar sensivelmente o escoamento externo de ar, a pressão interna será aproximadamente a média das pressões externas nas bordas desta abertura. Isto vale tanto para abertura em uma parede (janelas, portas, portões, etc.) como no telhado (lanternins, telhas com ventilação, etc.).

De acordo com Blessmann (1991, p. 8-9), a consideração tão correta quanto possível da pressão interna torna-se particularmente importante nas construções com grandes espaços internos e com telhados leves, tais como pavilhões para exposições e para indústrias, hangares, estações ferroviárias e rodoviárias, cinemas, igrejas, salões de clubes, pavilhões agrícolas e pecuários, depósitos de cereais, etc. Nestas construções as aberturas são especialmente prejudiciais quando se concentram em zonas submetidas a sobrepressões elevadas, causando assim fortes sobrepressões internas. Por outro lado, a existência de uma

sucção interna é favorável à estabilidade do telhado, pois ela se opõe às sucções externas, diminuindo assim a força de sustentação no mesmo. Isto pode ser conseguido por uma distribuição deliberada de permeabilidade nas paredes e cobertura, em locais convenientes, ou por um dispositivo de ventilação que atue como uma abertura dominante em um local submetido a sucções externas. Como exemplo de tais dispositivos pode-se citar:

- a) cumeeiras com ventilação, em telhados submetidos a sucções para todas as incidências do vento;
- b) aberturas permanentes nas paredes paralelas à direção do vento e situado próximo às bordas de barlavento (que são zonas de altas sucções externas);
- c) aberturas permanentes em toda a periferia, tais como janelas com aberturas permanentes.

4.6 ÍNDICE DE PERMEABILIDADE E ABERTURA DOMINANTE

Segundo Blessmann (1991), a permeabilidade de uma construção deve-se à existência de aberturas em suas faces externas (paredes e cobertura). Elas podem ser classificadas em:

- a) pequenas aberturas, tais como frestas em portões e janelas fechadas, entre telhas e painéis de vedação de paredes, pequenas ventilações em cumeeiras, telhas com ventilação, chaminés, etc.;
- b) grandes aberturas: vãos abertos de portas e janelas, lanternins abertos, etc.

Esta classificação é imprecisa, pois, mais do que valores absolutos, interessa a relação entre aberturas em zonas em sobrepressão e em zonas em sucção, ambas externas. Quando as aberturas estão disseminadas mais ou menos uniformemente em toda a superfície externa das paredes (e não são demasiadamente grandes), os coeficientes de pressão interna terão valores absolutos pequenos, que se situam entre 0 e 0,3 (algebricamente, entre -0,3 e +0,3). O valor do coeficiente de pressão interna, em cada caso particular, dependerá de como se distribuem realmente estas pequenas aberturas nas faces da construção.

Dois conceitos importantes para o cálculo da pressão interna são os de índice de permeabilidade e abertura dominante. O índice de permeabilidade de uma parte de uma construção é a relação entre a área das aberturas existentes nesta parte e a área total desta

parte. Em geral o índice de permeabilidade (ou, simplesmente, permeabilidade) é expresso em porcentagem da área da parte considerada.

A avaliação precisa deste índice é difícil. Na maioria dos casos é possível somente a indicação de valores aproximados. Para o caso de construções para moradias ou escritórios, com todas as janelas e portas fechadas, este índice situa-se entre 0,01% e 0,1%, ou mesmo mais (NEWBERRY; EATON, 1974 apud BLESSMANN, 1991) Cook (1990 apud BLESSMANN, 1991) indica os seguintes valores, medidos em diversos países:

- a) edifícios para escritórios,
 - Canadá (12 edifícios): 0,036 % \pm 0,0046 %;
 - Estados Unidos (6 edifícios): 0,039 % \pm 0,0164 %;
- b) edifícios para residências,
 - Reino Unido: 0,1040 %;
 - Canadá: 0,0380 %;
 - Suécia: 0,0207 %;
- c) paredes internas: Holanda: 0,1040 %.

De acordo com Blessmann (1991, p. 11), a determinação deste índice deve ser feita com cautela, deve-se lembrar também que alterações importantes na permeabilidade durante a vida útil da construção podem levar a carregamentos mais nocivos que os inicialmente previstos.

O índice de permeabilidade de uma parte da edificação é definido pela relação entre a área das aberturas e a área total desta parte. Esse 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 fechadas, está compreendido entre 0,01% e 0,05% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12).

Segundo Blessmann (1991, p. 11-12), uma abertura dominante é uma abertura cuja área domina a área de cada uma das demais aberturas. Costuma-se definir abertura dominante como aquela cuja área é N vezes maior que a área total das demais aberturas (pequenas aberturas) existentes nas faces da construção, incluindo a cobertura, se houver forro permeável ou na ausência de forro. A abertura dominante pode ser um conjunto de aberturas

situadas todas em uma mesma zona de uma face da construção, zona na qual as pressões são de mesmo sinal.

Antigamente as normas consideravam ser necessária uma abertura com área igual a 30% ou mesmo 33% da área da parede para que a pressão interna atingisse um valor próximo ou igual ao da pressão externa na zona desta abertura. Entretanto, uma abertura com cerca de 1% da área da parede em que se encontra já pode conduzir a pressões internas dominadas pela pressão externa na zona da abertura. Basta para isto que a permeabilidade das faces da construção seja baixa (BLESSMANN, 1991, p. 11).

O autor também cita que janelas, portas e painéis envidraçados (fixos ou móveis) podem ser abertos, rompidos ou arrancados pela pressão do vento (sobrepessões ou sucções) ou por objetos lançados pelo vento. Forma-se assim uma grande abertura, em muitos casos não prevista na determinação da pressão interna. Cita-se, como exemplo, o caso de portões situados na parede de barlavento de pavilhões industriais ou hangares, que têm sido abertos violentamente (ou mesmo arrancados) pelo vento, estabelecendo-se no interior uma forte sobrepressão interna, que soma seus efeitos aos das sucções externas.

A importância de uma abertura dominante é indicada na figura 7. Na figura 7.1 esta abertura está situada a barlavento, possuindo as demais faces uma permeabilidade normal. A pressão interna será aproximadamente a pressão externa existente na zona da abertura. Consequentemente, serão majoradas as ações do vento nas paredes laterais e de sotavento (todas elas submetidas a sucções externas), bem como no telhado (o qual, exceto para inclinações muito altas, está também submetido a sucções). Por outro lado, a ação sobre a parede de barlavento será muito pequena, próxima a zero. Para o caso da figura 7.2, com a abertura dominante na parede de sotavento, a pressão interna será próxima do valor da pressão externa nessa parede. Diminuirão as ações do vento nas paredes laterais e de sotavento (nesta ficará próxima a zero) e no telhado (se, como antes, estiver submetido a sucções). Aumentará a ação do vento na parede de barlavento. Para o caso da figura 7.3, com aberturas mais ou menos da mesma área nas paredes de barlavento e de sotavento, o vento passará por dentro da construção. As pressões internas variarão um pouco (no espaço) pelo efeito de expansão na parte central da construção, porém, com valores intermediários aos dois casos anteriores, e por isso sem interesse prático (BLESSMANN, 1991, p.12).

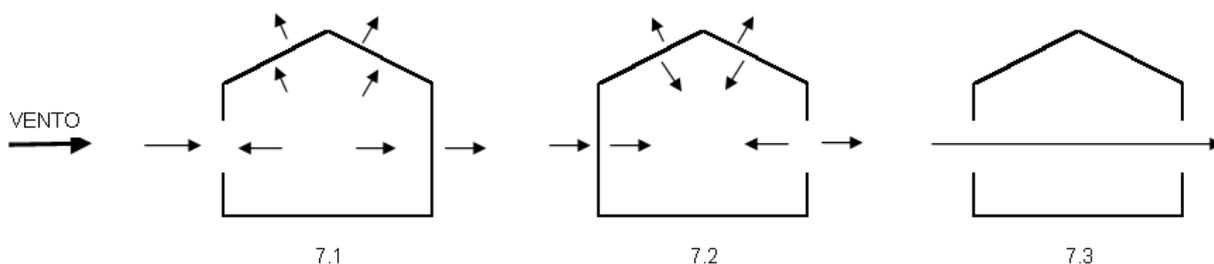


Figura 7: influência da localização da abertura dominante
(adaptado de BLESSMANN, 1991, p. 12)

Conclui-se que durante ventos de altas velocidades, para garantir a estabilidade de telhados leves é conveniente abrir portas e janelas situadas a sotavento. (BLESSMANN, 1991, p. 12).

- a) aumento de 100 % a sotavento: coeficiente de pressão interna não sofre alteração;
- b) aumento de 50% a barlavento: coeficiente de pressão interna passou de -0,32 para -0,26;
- c) aumento de 100% a barlavento: coeficiente de pressão interna passou de -0,32 para -0,20.

De acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12), abertura dominante é uma abertura cuja área é igual ou superior à área total das aberturas que constituem a permeabilidade considerada sobre toda a superfície externa da edificação (inclui a cobertura, se houver forro permeável ao ar ou na ausência de forro). Esta abertura dominante pode ocorrer por acidente, como a ruptura de vidros fixos causada pela pressão do vento (sobrepessão ou sucção), por objetos lançados pelo vento ou por outras causas.

4.7 COEFICIENTES DE PRESSÃO INTERNA

De acordo com a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12), para as edificações com paredes internas permeáveis a pressão interna pode ser considerada uniforme. Os valores que podem ser adotados os para o coeficiente de pressão interna c_{pi} são os apresentados nos quadros 5 e 6.

Caso	Condição	Incidência do Vento	c_{pi}
a	Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis	Vento perpendicular a uma face permeável	0,2
		Vento perpendicular a uma face impermeável	-0,3
b	Quatro faces igualmente permeáveis	Valor mais nocivo	-0,3 ou 0
		Vento perpendicular a uma face permeável	0,2
		Vento perpendicular a uma face impermeável	-0,3

Quadro 5: Coeficientes de pressão interna – casos a e b (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12)

Conforme a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14), o valor de c_{pi} pode ser limitado ou controlado vantajosamente por uma distribuição deliberada de permeabilidade nas paredes e cobertura, ou por um dispositivo de ventilação que atue como uma abertura dominante em uma posição com um valor adequado de pressão externa. Exemplos de tais dispositivos são:

- a) cumeeiras com ventilação em telhados submetidos a sucções para todas as orientações do vento, causando uma redução da força ascensional sobre o telhado;
- b) aberturas permanentes nas paredes paralelas à direção do vento e situadas próximas às bordas de barlavento (zonas de altas sucções externas), causando uma redução considerável da força ascensional sobre o telhado.

Caso	q	Localização da Abertura Dominante	Zona de Alta Sucção Externa (sim/não)	Proporção entre a área de todas as aberturas na face de barlavento e a área total das aberturas em todas as faces submetidas a sucções	Proporção entre a área da abertura dominante (ou área das aberturas situadas nesta zona) e a área total das outras aberturas situadas em todas as faces submetidas a sucções externas	c_{pi} :			
c	Abertura dominante em uma face; as demais faces de igual permeabilidade	Abertura dominante na face de barlavento		1		0,1			
				1,5		0,3			
		Abertura dominante na face de sotavento		2		0,5			
				3		0,6			
				≥ 6		0,8			
				Adotar o valor do coeficiente de forma externo C_{pe} correspondente a esta face					
				abertura dominante em uma face paralela ao vento		não	sim	0,25	-0,4
								0,5	-0,5
		0,75	-0,6						
		Adotar o valor do coeficiente de forma externo C_{pe} correspondente ao local da abertura nesta face							
					1	-0,7			
					1,5	-0,8			
					≥ 3	-0,9			

Quadro 6: Coeficientes de pressão interna – caso c (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12)

4.8 INFLUÊNCIA DO TIPO DE ABERTURA NAS PRESSÕES INTERNAS

De acordo com um estudo experimental em túnel de vento realizado por Loredou-Souza e Joaquim Blessmann (1993), as pressões internas (PI) que ocorrem, devidas ao vento, em um pavilhão industrial sem divisões internas, foi estabelecida uma fórmula que melhor se ajusta aos resultados nas condições dos ensaios. Resultados para vento turbulento e deslizante indicam a validade da fórmula mais usual do tipo $Q = K \cdot A \cdot (\Delta p)^n$, com n em torno de 0,65, para K considerado constante, e abertura dominante com $N \geq 2$. As PI mostram pouca variação espacial, justificando o uso de apenas um coeficiente interno (C_i) para todo o interior da edificação. Constata-se também que o tipo de abertura tem influência no comportamento da PI, e que o tipo de vento exerce somente uma influência indireta, através da pressão externa.

Segundo os mesmos autores, a PI pode sofrer alteração devido a três fatores:

- a) ação do vento;
- b) gradientes térmicos entre o interior e o exterior da edificação;
- c) ventilação mecânica.

No estudo realizado pelos autores, abordou-se o efeito isolado do primeiro fator.

Segundo os autores, é fato que PI causadas pelo vento em edificações têm recebido bem menos atenção, por parte dos pesquisadores, do que as pressões externas. O carregamento devido às PI pode vir a constituir-se em uma alta parcela da carga total devida ao vento, especialmente em edificações tipo pavilhões industriais.

Recentemente, um estudo realizado sobre os efeitos causados pela passagem do furacão Andrew, nos Estados Unidos, em edificações baixas, constatou-se que o correto dimensionamento considerando-se a pressão interna poderia ter evitado uma falha inicial na cobertura e evitado o colapso da edificação, como ocorreu em diversos casos (LOREDO-SOUZA et al,1993).

5 PAVILHÃO INDUSTRIAL ESTUDADO

O modelo considerado é de um pavilhão industrial sem divisórias internas, com cobertura de duas águas. A seguir são apresentados o método de desenvolvimento do trabalho, as características físicas do pavilhão estudado, como suas dimensões. Também são apresentadas neste capítulo as aberturas consideradas nos casos estudados e as combinações estudadas.

5.1 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para a realização dos ensaios no modelo reduzido do pavilhão foram aplicados os procedimentos detalhados nos parágrafos seguintes.

Primeiramente foi escolhido o modelo de pavilhão a ser adotado no trabalho. O modelo, para os casos estudados, é um modelo rígido, não reproduzindo a rigidez do edifício real, apenas a sua geometria. O modelo reduzido utilizado para a análise foi confeccionado em escala adequada, mantendo sempre as condições de semelhança com a situação real, visando obter a maior fidelidade e qualidade possível dos resultados. Este modelo havia sido ensaiado para a dissertação de mestrado de Loredou-Souza.

A velocidade do vento considerada para os ensaios em túnel de vento foi de 25m/s. Após a definição da velocidade do vento que age sobre a edificação considerada, foram determinados os carregamentos, tanto externos quanto internos, de acordo com as orientações da NBR 6123/88.

O pavilhão considerado foi estudado para três casos de fechamentos laterais, em que se alternava o tipo, o tamanho e a localização das aberturas constantes em suas faces. Em seguida, fez-se um comparativo com os resultados obtidos dos ensaios em túnel de vento do mesmo pavilhão para os três casos considerados.

De acordo com o acima exposto, nas próximas seções serão explanados as dimensões do pavilhão, os fechamentos laterais e de oitão e os casos estudados.

5.2 DIMENSÕES

O modelo utilizado para ensaio à época, foi construído sobre uma base retangular de madeira de 13mm de espessura e dimensões em planta de 500mm x 700mm. O modelo foi construído em madeira, exceto a cobertura, feita em alumínio. Um desenho esquemático do pavilhão é mostrado na figura 8, e suas dimensões no quadro 7.

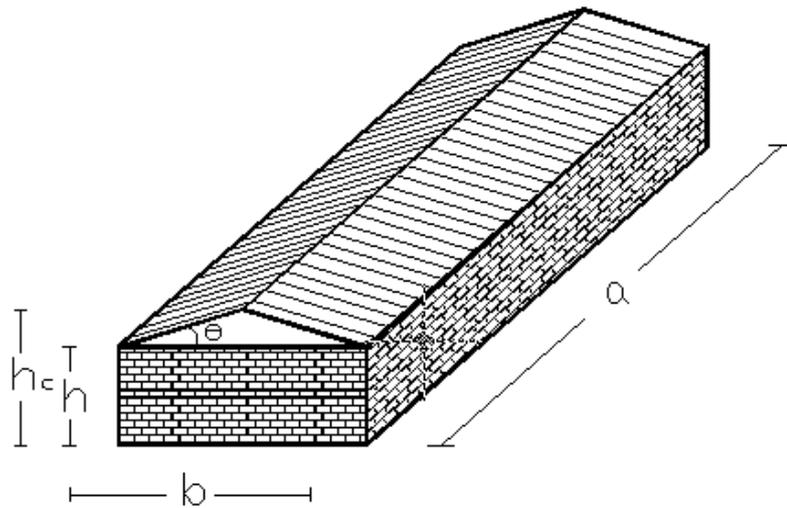


Figura 8: desenho esquemático do pavilhão estudado

DIMENSÕES (mm)	PROPORÇÕES
$a = 400$	$a \times b \times h$
$b = 200$	$2 \times 1 \times 0,25$
$h = 50$	$\theta = 12^\circ$
$h_c = 71,3$	

Quadro 7: dimensões e proporções do pavilhão estudado

5.3 FECHAMENTOS LATERAIS E DE OITÃO

Os modelos e tipos de aberturas foram estabelecidos por módulos. A localização da inserção destes módulos é mostrada na figura 9.

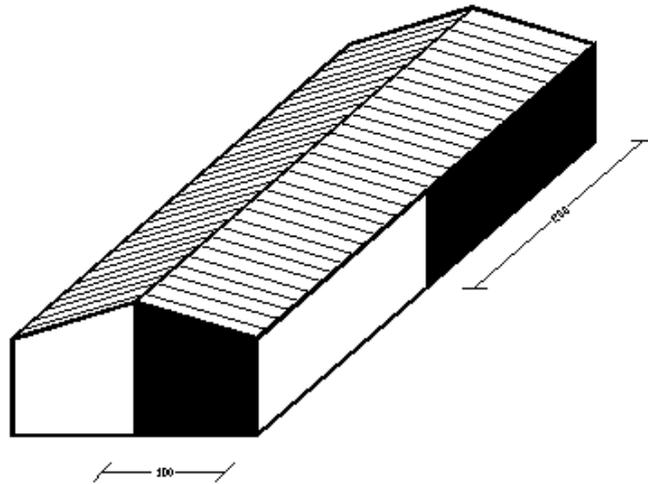


Figura 9: localização da inserção dos módulos de fechamento lateral e de oitão

As aberturas consideradas nos fechamentos laterais e oitões são de três tipos básicos:

- a) abertura tipo portão;
- b) permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares;
- c) janelas tipo basculante (apenas nos oitões).

Estas aberturas foram executadas com chapas de alumínio, de 1mm de espessura, fixadas em apoios internos feitos em madeira, através de velcro. Isto permitia, de uma maneira rápida, a troca do tipo de fechamento. Além do velcro, a fixação era completada pela colocação de fita adesiva ao longo do perímetro das frestas do modelo, inclusive na interface das paredes com a base. A fita adesiva teve duas finalidades: a primeira, como já dito, de fixação, e a segunda como vedação das possíveis frestas existentes na zona de fronteira das placas. Algumas características a respeito das aberturas são exibidas no quadro 8. Os três tipos de aberturas utilizados, tanto para oitão como para fechamento lateral, são ilustrados nas figuras 10 a 14.

	% das aberturas em relação à área das paredes que as contém	Proporção em relação à maior abertura do oitão	Área vazada (mm ²)
OITÃO	10,00%	1	1200
PAREDES LATERAIS	3,00%	1/2	600

Quadro 8: características das aberturas experimentadas

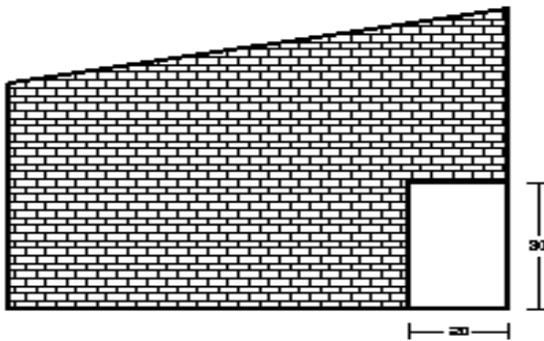


Figura 10: janelas tipo portão no oitão

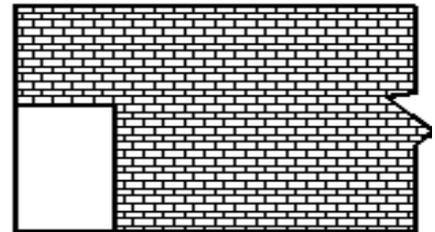


Figura 11: janelas tipo portão no fechamento lateral

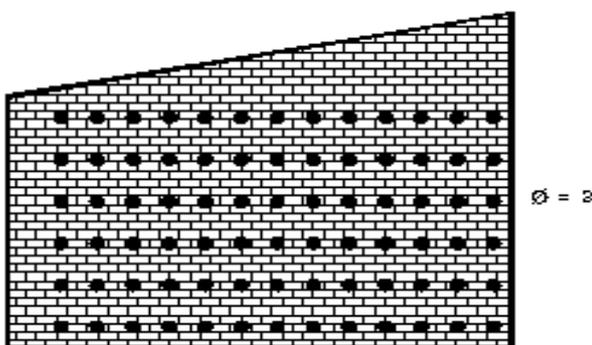


Figura 12: permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares no oitão

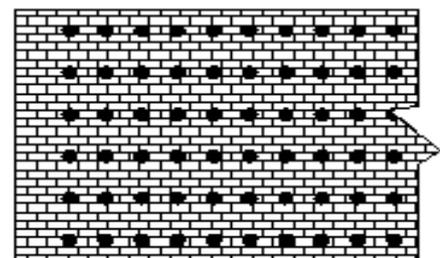


Figura 13: permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares no fechamento lateral

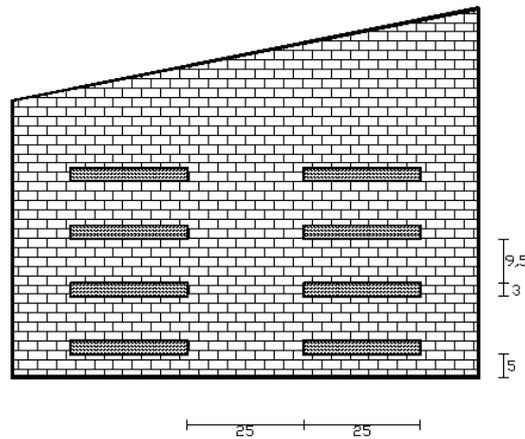


Figura 14: janelas tipo basculante para oitão

5.4 CASOS ESTUDADOS

De acordo com o que foi exposto em 5.2, três são os tipos de aberturas estudadas. Este trabalho baseia-se na combinação destes três tipos conforme explicado no parágrafo seguinte.

A maior abertura de cada tipo, localizada no oitão do pavilhão, caracteriza os casos de ensaios ao ser combinada com outras aberturas no fechamento lateral do prédio. A abertura do oitão caracteriza o caso. Em cada um dos três casos raízes, são derivadas duas combinações com fechamentos laterais. O **caso a** reproduz metade do tamanho da abertura do oitão em cada fechamento lateral. O **caso b** reproduz uma área de abertura equivalente à área de abertura do oitão em cada fechamento lateral. Todos os casos são para um mesmo ângulo de incidência de vento ($\alpha = 0^\circ$). Desta forma, 9 combinações são estudadas neste trabalho. O ângulo de incidência do vento (α) é mostrado na figura 15 e os casos raízes e as combinações feitas são apresentadas na figura 16.

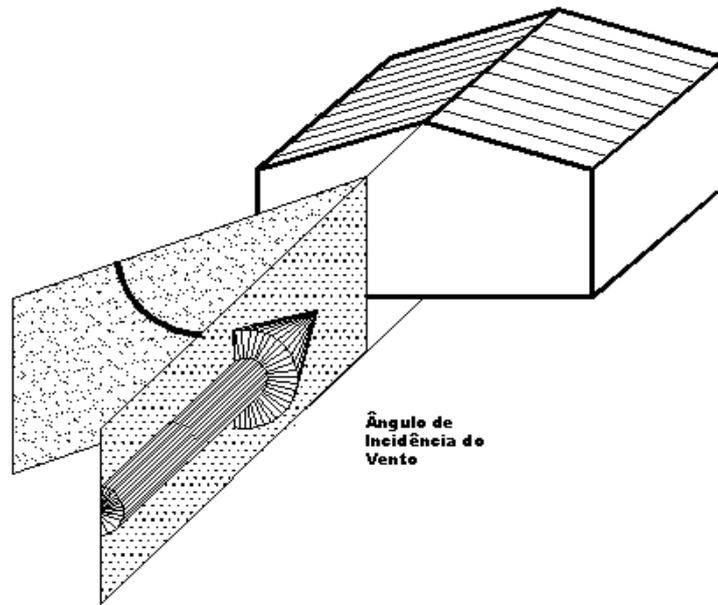


Figura 15: ângulo de incidência do vento no pavilhão

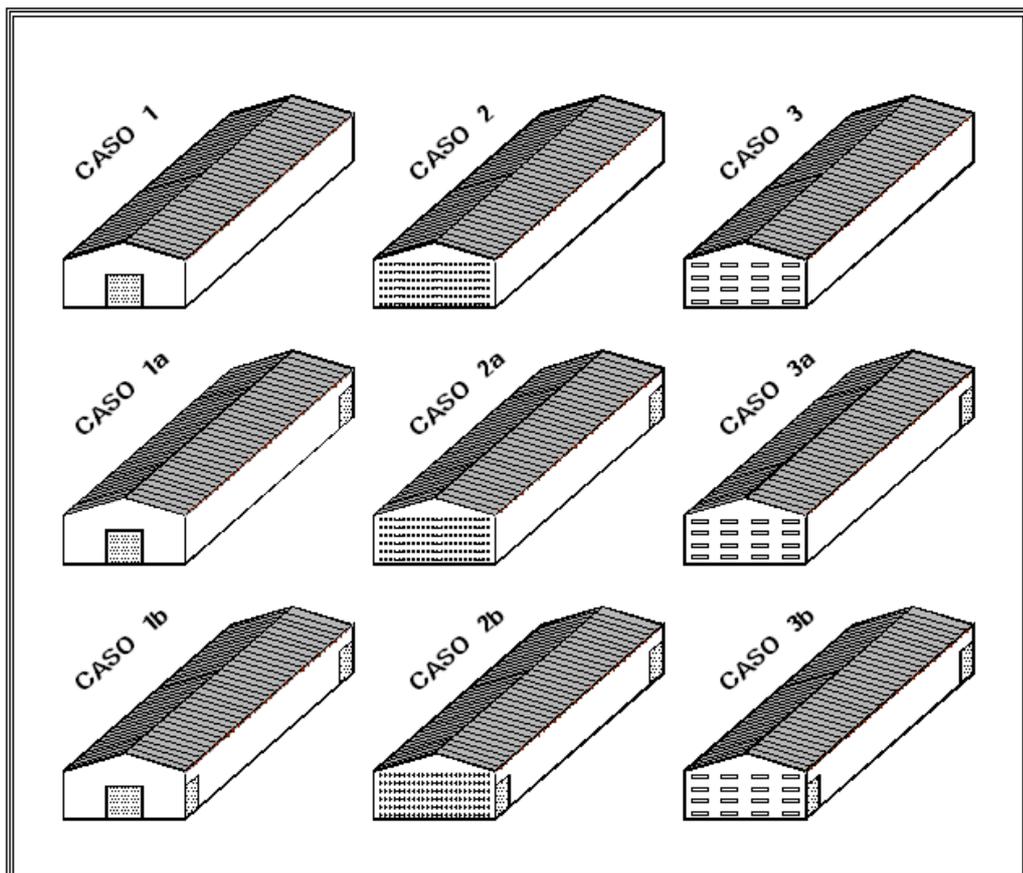


Figura 16: combinações de fechamentos laterais no pavilhão industrial estudado

Os casos são explicados abaixo:

- a) caso 1: há apenas uma abertura do tipo portão no oitão frontal do pavilhão. Demais faces impermeáveis;
- b) caso 2: há abertura do tipo permeabilidade disseminada no oitão frontal do pavilhão. Demais faces impermeáveis;
- c) caso 3: há abertura do tipo janela basculante no oitão frontal do pavilhão. Demais faces impermeáveis;
- d) **caso a**: a abertura do caso raiz permanece no oitão frontal; há a inserção de aberturas com área equivalente a metade da área da abertura do oitão em cada fechamento lateral;
- e) **caso b**: a abertura do caso raiz permanece no oitão frontal; há a inserção de aberturas com área equivalente a área do oitão em cada fechamento lateral.

O quadro 9 agrupa as informações expostas acima, indicando a proporção em área de abertura na lateral em relação à abertura localizada no oitão frontal.

Caso	Tipo de Abertura	Proporção em área de abertura na lateral em relação à abertura localizada no oitão			
		Oitão Frontal	Oitão Fundos	Lateral Esquerda	Lateral Direita
1	portão	1	0	0	0
1a		1	0	1/2	1/2
1b		1	0	1	1
2	furos	1	0	0	0
2a		1	0	1/2	1/2
2b		1	0	1	1
3	vazados tipo basculante	1	0	0	0
3a		1	0	1/2	1/2
3b		1	0	1	1

Quadro 9: proporção em relação à maior abertura do oitão, localização e tipo de cada abertura para os nove casos estudados

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados analíticos e experimentais para coeficientes de pressão externa e interna.

6.1 RESULTADOS ANALÍTICOS

A seguir, são apresentados os resultados analíticos obtidos para os coeficientes de pressão externa e interna do modelo de pavilhão estudado. Os resultados serão analisados caso a caso e após serão todos reunidos a fim de um comparativo.

6.1.1 Coeficientes de Pressão Externa

Os coeficientes de pressão externa são obtidos através do quadro 4.

Para o pavilhão estudado, tem-se a seguinte situação:

$$\frac{a}{b} = \frac{400}{200} = 2$$

Onde:

a = maior dimensão em planta do pavilhão;

b = menor dimensão em planta do pavilhão;

$$\frac{h}{b} = \frac{5}{20} = 0,25$$

Onde:

h = altura do pé direito mais baixo do pavilhão (calha);

b = menor dimensão em planta do pavilhão;

Com isto, obtém-se os valores dos coeficientes de pressão externa através do quadro 4, o que nos permite montar o diagrama representado pela figura 17. Adota-se a cor vermelha para sucção e verde para sobrepressão. A figura 18 mostra as pressões externas em um desenho tridimensional.

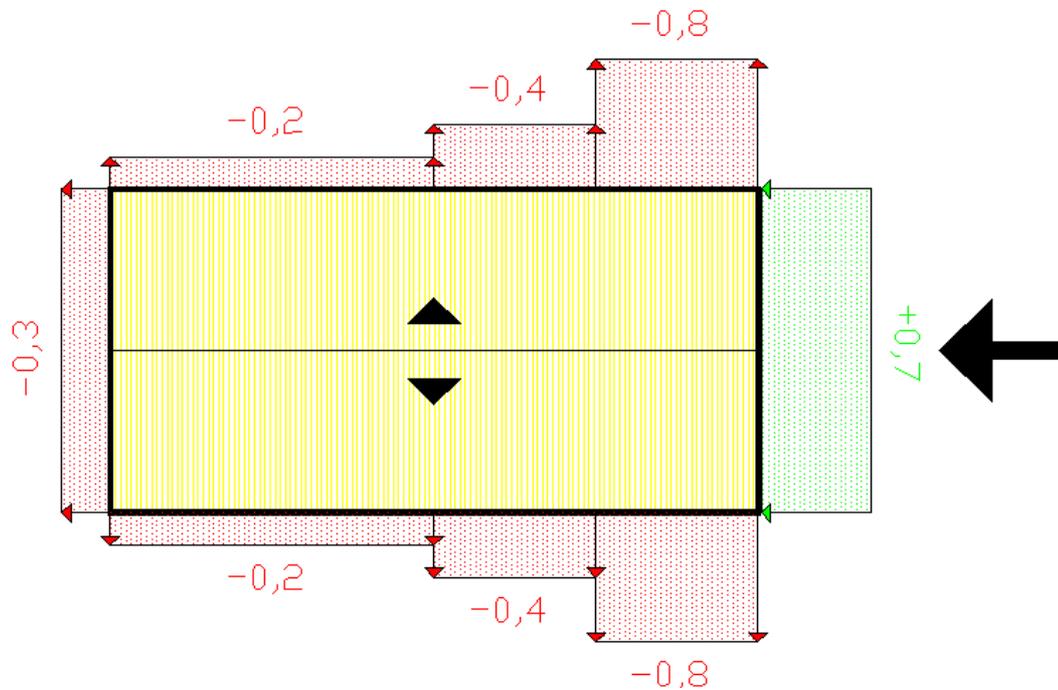


Figura 17: diagrama dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial estudado

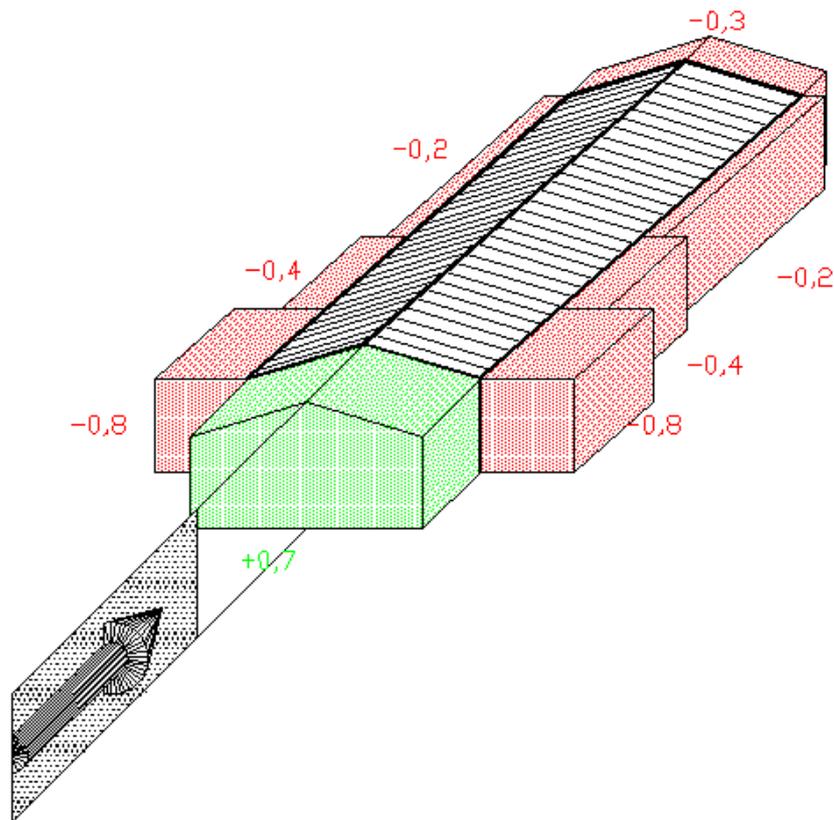


Figura 18: diagrama tridimensional dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial estudado

6.1.2 Cálculo da Pressão Interna

Após a determinação dos coeficientes de pressão externos, desenvolve-se o cálculo da pressão interna conforme procedimento descrito em 3.5 deste trabalho. A proposta é que o coeficiente de pressão interna seja obtido através da fórmula usual (expressão 24), em função dos coeficientes de forma externos, calculados sobre a superfície das aberturas. Reitera-se que, conforme discutido no item 3.6, a primeira iteração da expressão 24, deve considerar como o primeiro valor inserido de C_i como sendo a média ponderada dos coeficientes de pressão externa do caso estudado, o que facilita o processo de cálculo pois reduz o número de iterações. Isto nem sempre ocorre neste trabalho, pois muitas vezes tem-se como objetivo demonstrar a instabilidade numérica da expressão 24.

O cálculo da pressão interna para os casos estudados é organizado em forma de tabela, de maneira a facilitar o entendimento do que está sendo feito. Para facilitar o entendimento das tabelas, é adotada a convenção mostrada na figura 19 para os fechamentos do pavilhão.

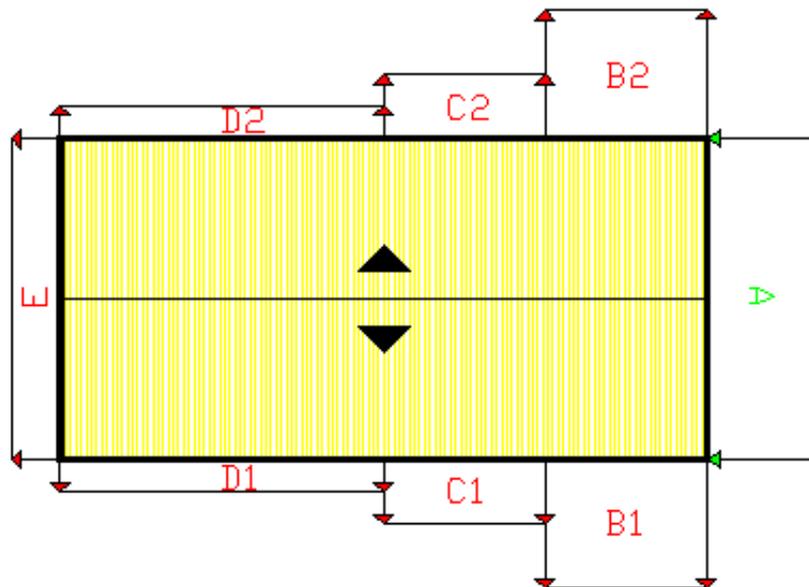


Figura 19: convenção adotada para denominação dos fechamentos laterais do pavilhão industrial estudado

Nos próximos itens é apresentado o desenvolvimento de cálculo de pressão interna caso a caso.

6.1.2.1 Caso 1

O caso 1 é o mostrado na figura 20. O pavilhão possui abertura do tipo portão no oitão frontal; as duas laterais, o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis.

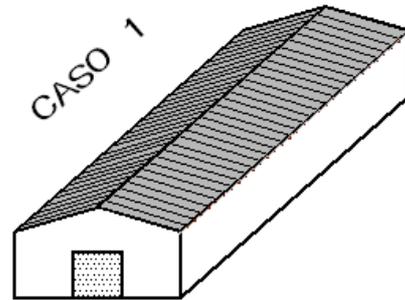


Figura 20: Caso 1

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 10.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,5		0,7	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,2	5,367	0	0,000
MÉDIA PONDERADA		0,7	∑	9,295	∑	5,367	∑	0,000

Quadro 10: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 1

6.1.2.2 Caso 1a

O caso 1a é o mostrado na figura 21. O pavilhão possui abertura do tipo portão no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1 e uma abertura no módulo D2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

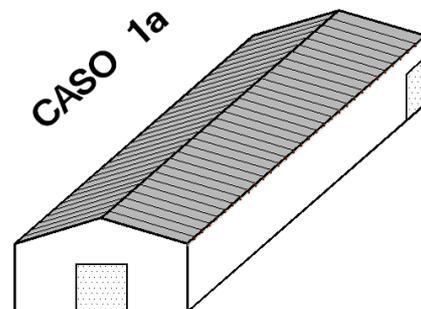


Figura 21: Caso 1a

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 11.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,3		0,25	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,4	7,589	0,45	8,050
D1	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
D2	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
MÉDIA PONDERADA	0,25		∑	2,722	∑	-0,896	∑	0,000

Quadro 11: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 1a

6.1.2.3 Caso 1b

O caso 1b é o mostrado na figura 22. O pavilhão possui abertura do tipo portão no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1, uma abertura no módulo D2, uma abertura B1 e uma abertura no módulo B2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

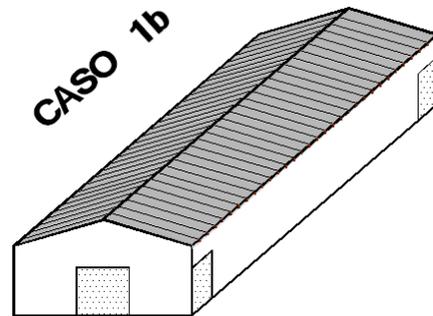


Figura 22: Caso 1b

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 12.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			-0,1		-0,6		-0,5	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,8	10,733	1,3	13,682	1,2	13,145
C1	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
C2	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
D1	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
D2	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
MÉDIA PONDERADA		-0,1	∑	-3,102	∑	0,726	∑	0,000

Quadro 12: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 1b

6.1.2.4 Caso 2

O caso 2 é o mostrado na figura 23. O pavilhão possui abertura do tipo permeabilidade disseminada no oitão frontal; as duas laterais, o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis.

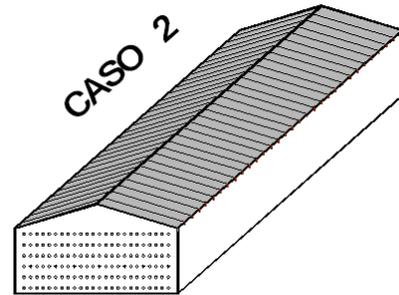


Figura 23: Caso 2

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 13.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,5		0,7	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,2	5,367	0	0,000
MÉDIA PONDERADA		0,7	∑	9,295	∑	5,367	∑	0,000

Quadro 13: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 2

6.1.2.5 Caso 2a

O caso 2a é o mostrado na figura 24. O pavilhão possui abertura do tipo permeabilidade disseminada no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1 e uma abertura no módulo D2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

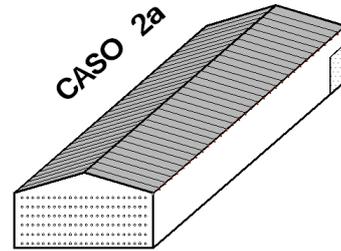


Figura 24: Caso 2a

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 14.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,3		0,25	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,4	7,589	0,45	8,050
D1	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
D2	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
MÉDIA PONDERADA		0,25	∑	2,722	∑	-0,896	∑	0,000

Quadro 14: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 2a

6.1.2.6 Caso 2b

O caso 2b é o mostrado na figura 25. O pavilhão possui abertura do tipo permeabilidade disseminada no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1, uma abertura no módulo D2, uma abertura B1 e uma abertura no módulo B2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

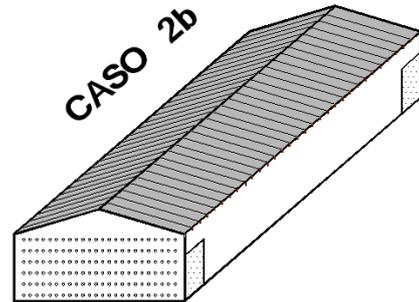


Figura 25: Caso 2b

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 15.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			-0,1		-0,6		-0,5	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,8	10,733	1,3	13,682	1,2	13,145
C1	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
C2	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
D1	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
D2	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
MÉDIA PONDERADA		-0,1	∑	-3,102	∑	0,726	∑	0,000

Quadro 15: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 2b

6.1.2.7 Caso 3

O caso 3 é o mostrado na figura 26. O pavilhão possui abertura do tipo janelas basculantes no oitão frontal; as duas laterais, o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis.

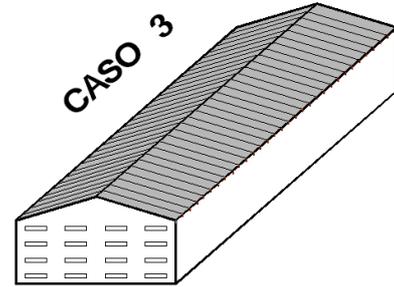


Figura 26: Caso 3

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 16.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,5		0,7	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,2	5,367	0	0,000
MÉDIA PONDERADA		0,7	∑	9,295	∑	5,367	∑	0,000

Quadro 16: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 3

6.1.2.8 Caso 3a

O caso 3a é o mostrado na figura 27. O pavilhão possui abertura do tipo janelas basculantes no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1 e uma abertura no módulo D2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

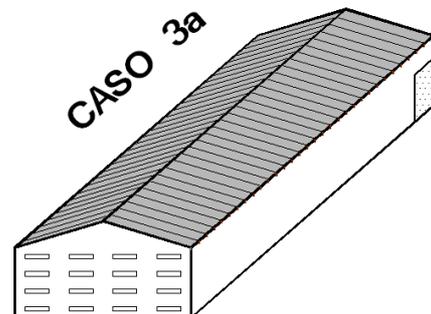


Figura 27: Caso 3a

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 17.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			0,1		0,3		0,25	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,6	9,295	0,4	7,589	0,45	8,050
D1	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
D2	6	-0,2	-0,3	-3,286	-0,5	-4,243	-0,45	-4,025
MÉDIA PONDERADA		0,25	∑	2,722	∑	-0,896	∑	0,000

Quadro 17: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 3a

6.1.2.9 Caso 3b

O caso 3b é o mostrado na figura 28. O pavilhão possui abertura do tipo janelas basculantes no oitão frontal; o oitão traseiro e a cobertura são impermeáveis e há uma abertura no módulo D1, uma abertura no módulo D2, uma abertura B1 e uma abertura no módulo B2, cada uma delas com a metade da área da abertura do oitão frontal.

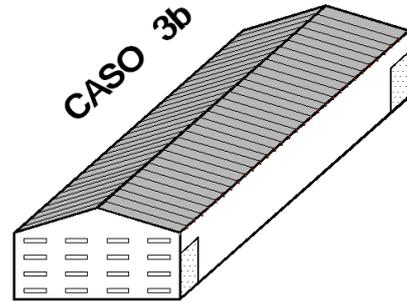


Figura 28: Caso 3b

O cálculo da pressão interna é apresentado no quadro 18.

Local	Área de Abertura (m ²)	C _e	C _i					
			-0,1		-0,6		-0,5	
			C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)	C _e - C _i	±√(C _e - C _i)
A	12	0,7	0,8	10,733	1,3	13,682	1,2	13,145
C1	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
C2	6	-0,8	-0,7	-5,020	-0,2	-2,683	-0,3	-3,286
D1	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
D2	6	-0,2	-0,1	-1,897	0,4	-3,795	0,3	-3,286
MÉDIA PONDERADA		-0,1	∑	-3,102	∑	0,726	∑	0,000

Quadro 18: cálculo do coeficiente de pressão interna caso 3b

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir, são apresentados os resultados experimentais obtidos para os coeficientes de pressão externa e interna do modelo de pavilhão estudado.

6.2.1 Coeficientes de Pressão Externa

A envoltória correspondente aos coeficientes de pressão externa obtidos experimentalmente é mostrada na figura 29.

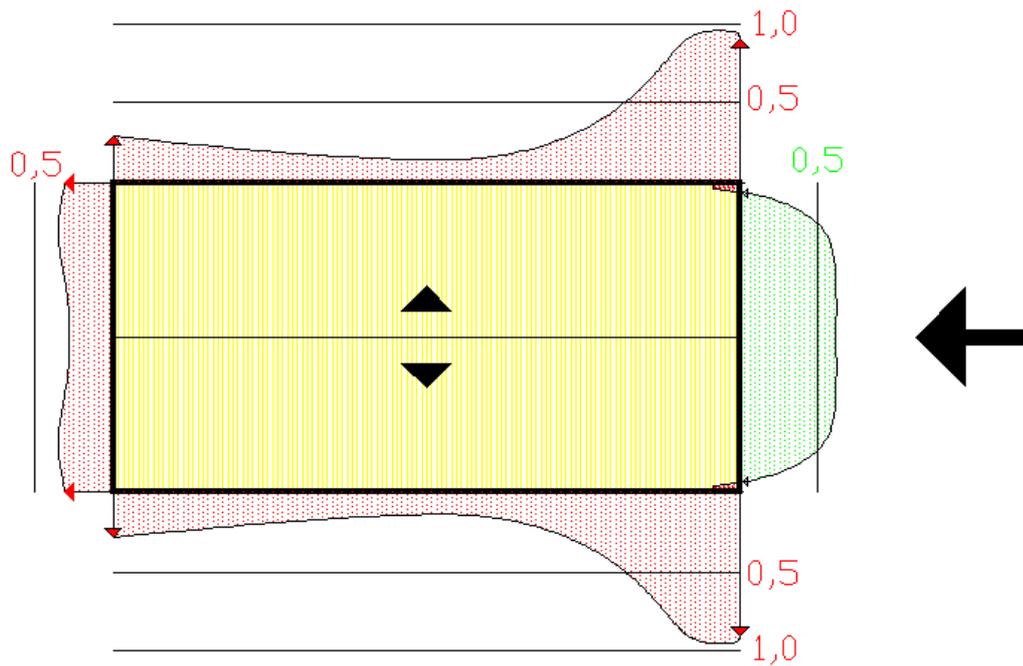


Figura 29: diagrama dos coeficientes de pressão externa para o pavilhão industrial ensaiado

6.2.2 Coeficientes de Pressão Interna

Os coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente são os mostrados no quadro 19. O quadro mostra os valores de pico, os valores mínimos e os valores médios dos coeficientes de pressão interna para os casos considerados. Reitera-se que neste trabalho são considerados apenas os coeficientes médios.

Caso	C_i (ensaiado)			
	Extremos		Media	Desvio
1	0,52	0,52	0,52	0
1a	0,2	0,32	0,23	0,025
1b	-0,24	-0,12	-0,17	0,04
2	0,52	0,52	0,52	0
2a	0,19	0,2	0,2	0,005
2b	-0,21	-0,16	-0,2	0,012
3	0,53	0,56	0,55	0,005
3a	0,19	0,23	0,21	0,01
3b	-0,21	-0,16	-0,17	0,016

Quadro 19: coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Percebe-se que o cálculo analítico do coeficiente de pressão interna não considera a forma das aberturas constantes nas faces do pavilhão estudado. O cálculo apenas considera a área total de abertura na face considerada. Desta forma, como todos os casos 1, 2 e 3, 1a, 2a e 3a, e 1b, 2b e 3b possuem a mesma metragem quadrada entre si, o resultado para o coeficiente de pressão interna calculado analiticamente resultou no mesmo valor, como não poderia deixar de ser.

Experimentalmente, o resultado não foi tão linear assim, e pode-se constatar que a localização e o tipo (geometria/forma/tamanho) de abertura, exercem influência, sim, sobre as pressões internas em pavilhões industriais.

O quadro 20 evidencia o que foi exposto acima, percebendo-se uma influência preponderante da localização da abertura em relação aos demais parâmetros. Convencionou-se que diferenças de até 0,05 são aceitáveis, diferenças entre 0,05 e 0,18 devem ser analisadas com mais cautela e diferenças acima de 0,18 são consideradas excessivas.

	Caso	Calculado	Ensaiado	Diferença
Portão	1	0,70	0,52	0,18
	1a	0,25	0,23	0,02
	1b	-0,50	-0,17	-0,33
Furos Circulares	2	0,70	0,52	0,18
	2a	0,25	0,2	0,05
	2b	-0,50	-0,2	-0,3
Abertura Tipo Janelas Basculantes	3	0,70	0,55	0,15
	3a	0,25	0,21	0,04
	3b	-0,50	-0,17	-0,33

Quadro 20: relação entre os coeficientes de pressão interna calculados e ensaiados

Analisando o quadro, pode-se inferir que se tem influência do tipo e localização da abertura nas pressões internas, obedecendo a hierarquia em termos de influência mostrada na figura 30 (ou seja, as figuras estão ordenadas em ordem crescente de variação entre coeficientes calculados e ensaiados):

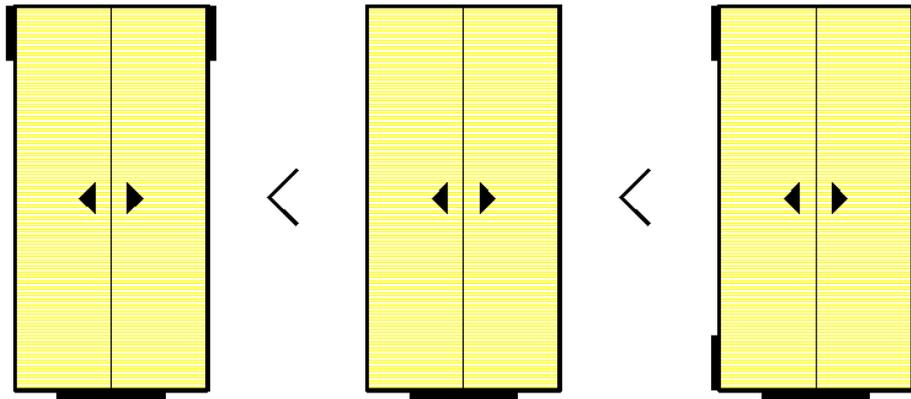


Figura 30: hierarquia de variação dos coeficientes de pressão interna ensaiados e calculados

Deve-se frisar que em todos os casos a Norma propôs coeficientes internos maiores (em valor absoluto) que os ensaiados.

Com relação a pressões externas, a Norma também age com bastante conservadorismo. Na figura 31, vê-se a sobreposição do resultado para a pressão externa calculada e o resultado ensaiado em túnel de vento. Adota-se a cor verde sempre que a Norma estiver a favor da segurança e está cobrindo o que efetivamente acontece na realidade. A cor vermelha indica que a Norma não foi a favor da segurança, e o resultado experimental se sobrepôs ao valor sugerido pela Norma. Observando a figura, pode-se inferir que a Norma é bastante conservadora no que tange a pressões externas. Nos casos nos quais o valor da Norma é menor que o obtido experimentalmente, a diferença é de apenas 5%. Mas, deve-se acrescentar que nos pontos em que isso ocorre, a Norma orienta que se utilize os coeficientes para revestimento, o que supre os 5% de ousadia da Norma com segurança substancial.

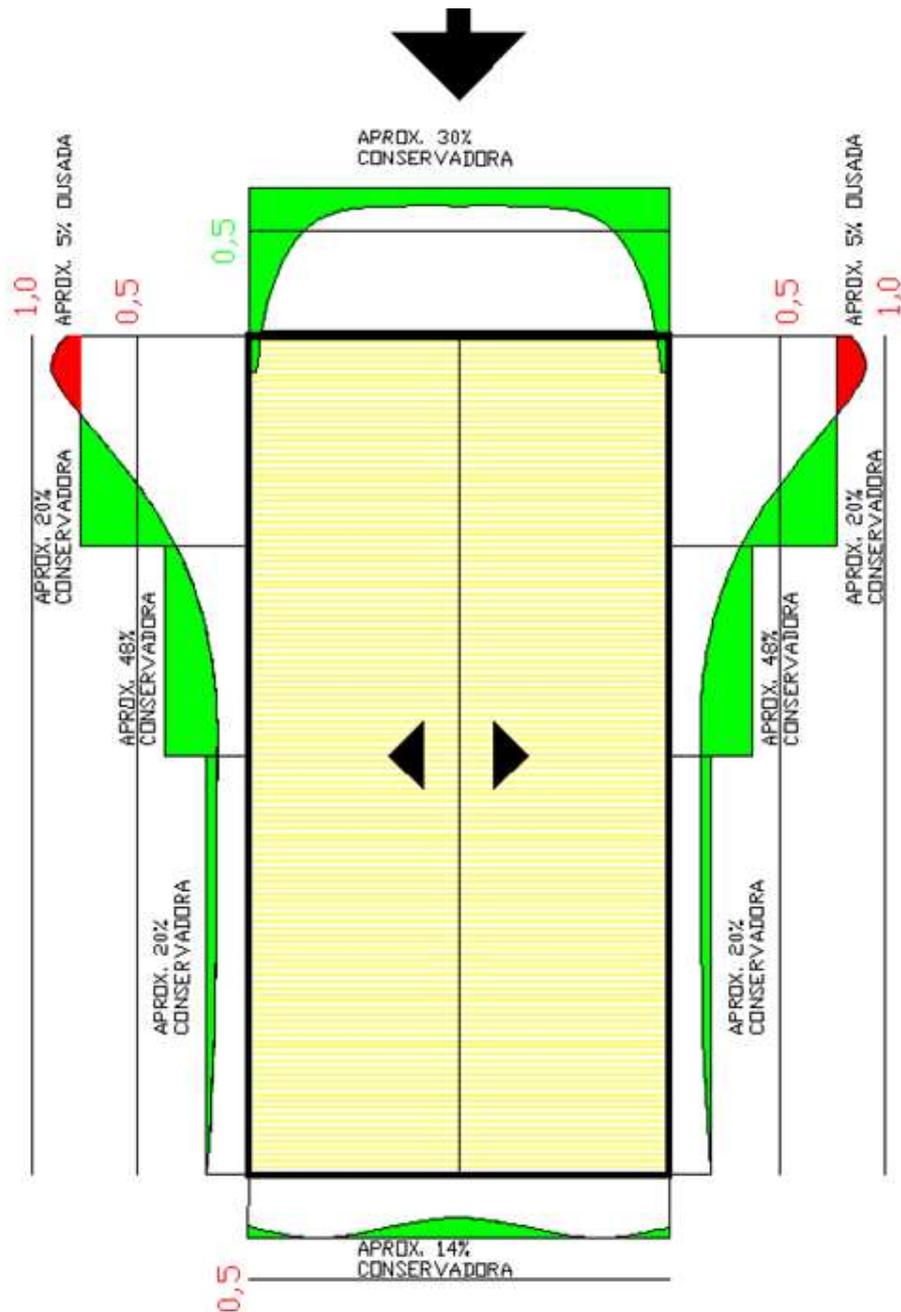


Figura 31: sobreposição dos efeitos da pressão externa tanto para o caso analítico como para o caso experimental (em termos de coeficientes)

Com esta análise das pressões externas, conclui-se que talvez fosse interessante que a Norma considerasse mais uma divisão para o trecho C, já que nesse trecho, ela está sendo aproximadamente 48% conservadora. A figura 32, que mostra um detalhe de $\frac{1}{4}$ da figura 31, mostra uma possível alteração na locação dos coeficientes.

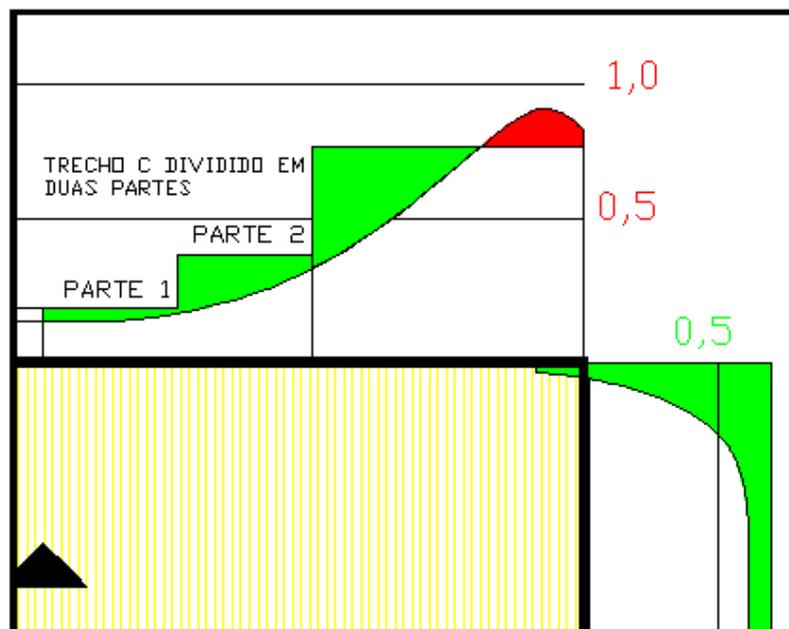


Figura 32: detalhe da possível alteração no trecho C, dividindo em duas partes

A figura 32 sugere que o trecho C poderia ser dividido em dois trechos, agindo em favor da economia e ainda assim não estaria agindo contra a segurança.

Este trabalho englobou nove casos de fechamentos para um modelo de pavilhão considerando uma direção do vento incidente. Os resultados obtidos demonstram que a hipótese deste trabalho está correta e que efetivamente o tipo e a localização da abertura influenciam os coeficientes de pressão interna.

Constata-se também, que em 2/3 dos casos estudados, a formulação indicada na NBR 6123 pode ser usada para projeto.

Do ponto de vista prático, sugere-se que o tipo e a localização das aberturas sejam determinados e dispostos de uma maneira que venha a contribuir para a segurança estrutural da edificação.

Em vista disso, sugere-se, como estudos posteriores, um trabalho que envolva um maior número de casos abordados (combinações), com uma gama maior de fechamentos a se considerar. Também, é de grande importância a consideração de outros ângulos de incidência do vento na edificação. Com isto, resultados cada vez mais consistentes a respeito da influência do tipo e localização de abertura em pavilhões industriais podem ser obtidos, o que pode vir a constituir-se em uma atualização da NBR6123/1988.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2. ed. Porto Alegre: SAGRA, 1990.
- BLESSMANN, J. **Pressão Interna**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1991.
- BLESSMANN, J. **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- SACHS, P. **Wind Forces on Engineering**. 2nd edition. Oxford, U.K. : Pergamon, 1978.
- SIMIU, E.; SCANLAN,R.H. **Wind Effects on Structures**. 2nd edition. [S.l.: s.n.] [ca. 1986].
- LOREDO-SOUZA, A. M. **Influence of Opening Type on Mean Internal Pressures in Low Buildings**. Nova Delhi, 1993.
- DAVENPORT, A. G. **The Relationship of Reliability to Wind Loadings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1975.
- DAVENPORT, A. G., SURRY, D., MIKITIUK, M., LOREDO-SOUZA, A. M., **Wind Pressures on Low Buildings in the Path of Hurricane Andrew**, The University of Western Ontario, 1993.
- SHAW, C. Y., **Air tightness: supermarkets and shopping malls**, ASHRAE Journal, v. 23. 1981.

ANEXO A – Ábaco para vento de alta turbulência

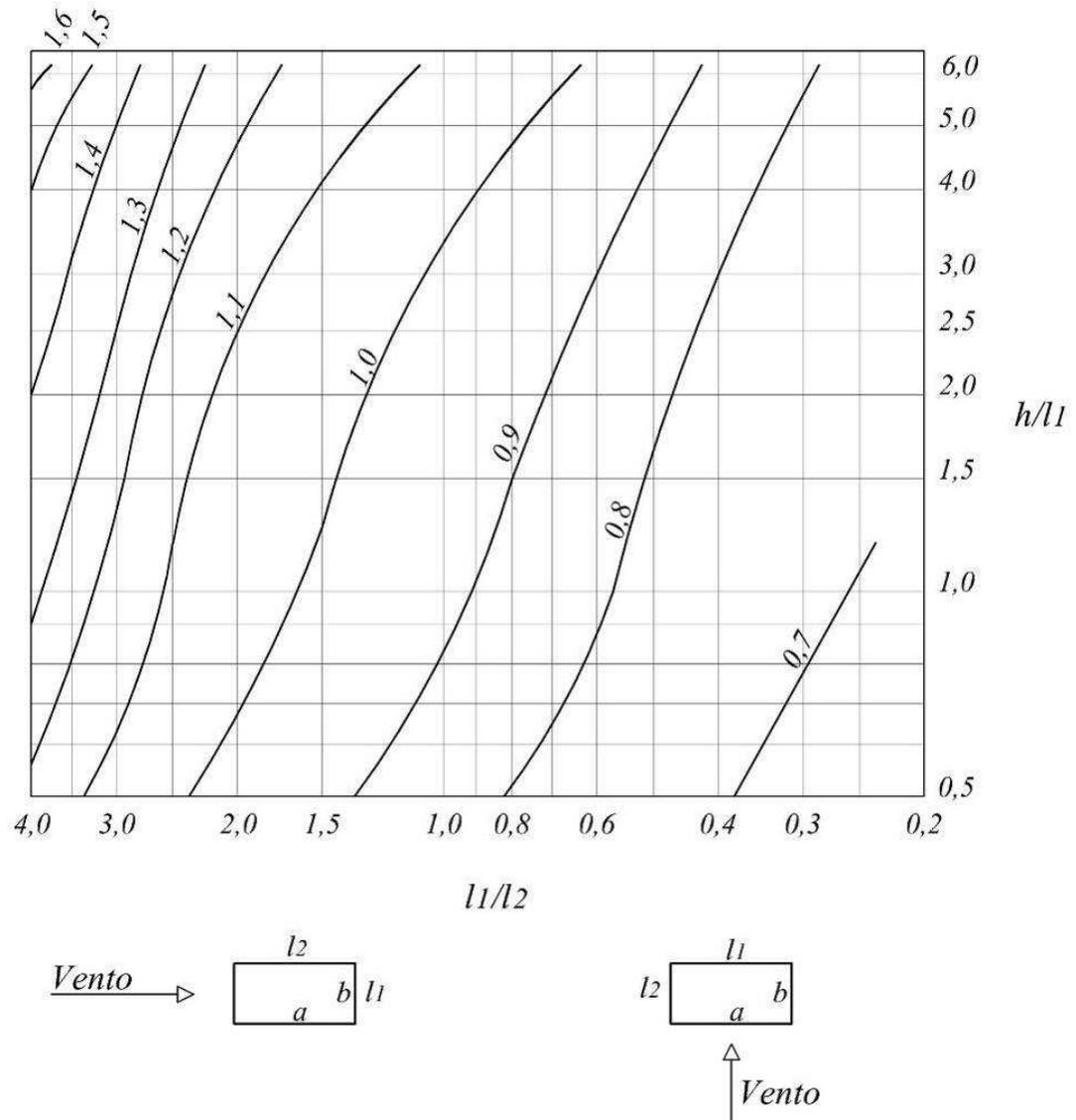


Figura AN1: coeficientes de arrasto para ventos de alta turbulência da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 24)

ANEXO B – Ábaco para vento de baixa turbulência

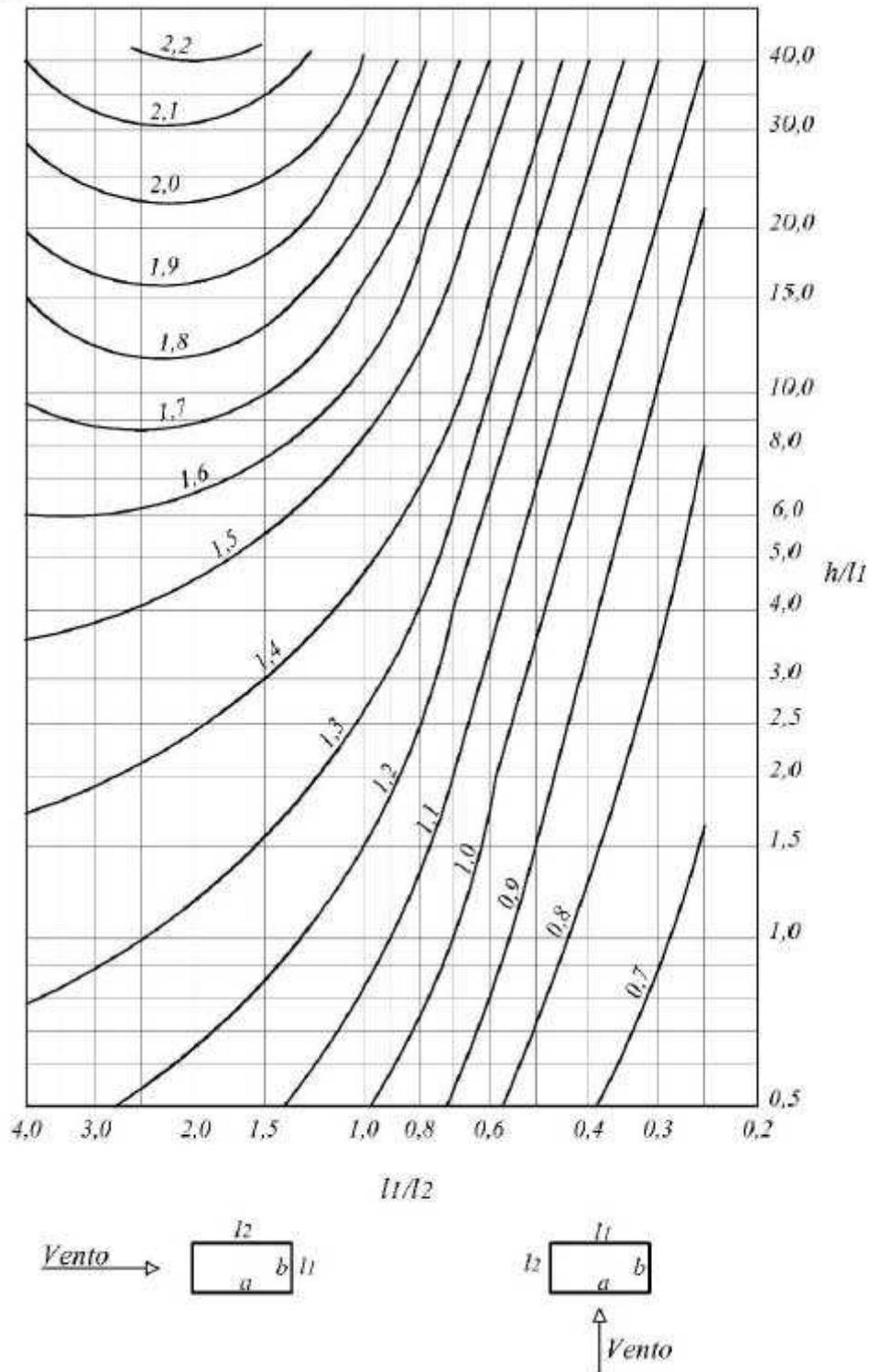


Figura AN2: coeficientes de arrasto para ventos de baixa turbulência da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 20)