

**PRESSÃO
INTERNA**

**JOAQUIM
BLESSMANN**

3ª edição revista
e ampliada



**PRESSÃO
INTERNA**



UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL

Reitor

Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor e Pró-Reitor
de Coordenação Acadêmica

Rui Vicente Oppermann

EDITORA DA UFRGS

Diretora

Sara Viola Rodrigues

Conselho Editorial

Alexandre Ricardo dos Santos

Carlos Alberto Steil

Lavinia Schüller Faccini

Mara Cristina de Matos Rodrigues

Maria do Rocio Fontoura Teixeira

Rejane Maria Ribeiro Teixeira

Rosa Nívea Pedroso

Sergio Antonio Carlos

Sergio Schneider

Susana Cardoso

Valéria N. Oliveira Monaretto

Sara Viola Rodrigues, presidente

**JOAQUIM
BLESSMANN**

**PRESSÃO
INTERNA**

3ª edição revista
e ampliada

© de Joaquim Blessmann

1ª edição: 1976

Direitos reservados desta edição:

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Capa e projeto gráfico: Cristiano Tarouco

Foto da capa: Arthur Senra

Editoração: Cristiano Tarouco e Alice Hetzel

A grafia desta obra foi atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa, de 1990, que entrou em vigor no Brasil em 1º de janeiro de 2009.

Joaquim Blessmann, engenheiro civil. Mestre e doutor em Ciências pela divisão de Engenharia Aeronáutica do ITA. Professor Emérito da UFRGS.

B647p Blessmann, Joaquim
Pressão interna / Joaquim Blessmann. – 3. ed. rev. e ampl. – Porto Alegre:
Editora da UFRGS, 2013.
104 p. ; 16x23cm

Reimpressão 2013

Inclui figuras e tabelas.

Inclui apêndices e referências.

1. Engenharia civil. 2. Pressão interna – Cálculo. 3. Pressão interna – Construções. 4. Permeabilidade – Paredes – Ensaios. 5. Ensaios – Lanternins. 6. Pressão interna – Variações temporais. 7. Pressão interna – Normas. I. Título.

CDU 624.042

CIP-Brasil. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação.
(Jaqueline Trombin – Bibliotecária responsável CRB10/979)

ISBN 978-85-386-0198-2

SUMÁRIO

Simbologia principal	7
1 Introdução	9
2 Cálculo da pressão interna	13
3 Ensaio: permeabilidade das paredes	25
4 Ensaio: lanternins	31
5 Variações temporais da pressão interna	45
6 Normas	53
7 Conclusões e recomendações	73
Apêndice A – Exemplos de cálculo da pressão interna	81
Referências	93

SIMBOLOGIA PRINCIPAL

$a \cdot b$ = dimensões em planta

A = área de parede; área de orifício; área de referência para cálculo de coeficientes aerodinâmicos

A_j = área da abertura de ordem j

A_p = área de parede

c_p = coeficiente de pressão = $c_{pe} - c_{pi}$

c_{pe} = coeficiente de pressão externa = $\Delta p_e / q$

c_{pi} = coeficiente de pressão interna = $\Delta p_i / q$

C = coeficiente de forma = $C_e - C_i$

C_e = coeficiente de forma externo = F_e / qA

C_i = coeficiente de forma interno = F_i / qA (em geral $C_i = c_{pi}$)

C_s = coeficiente de sustentação = F_s / qA

d = diâmetro da base de uma cúpula

f = flecha de uma cúpula

F_e = resultante das pressões externas atuantes sobre uma superfície plana

F_i = resultante das pressões internas atuantes sobre uma superfície plana

F_s = força de sustentação ou Sustentação. Componente vertical das forças do vento

h = altura de parede

K = coeficiente de vazão

q = pressão dinâmica ao longe = $(1/2) \rho \bar{V}^2$

Q = vazão volúmica

\bar{V} = velocidade média de referência do vento

\bar{V}_{z_0} = velocidade média do vento na altura z_0

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

Δp_e = pressão efetiva externa

Δp_i = pressão efetiva interna

ρ = massa específica do ar

μ = percentagem de aberturas em uma superfície

INTRODUÇÃO

a) “Quando o telhado de cobre da Catedral Ribe, na Dinamarca, foi renovado há cerca de 25 anos atrás, a importância das aberturas em saliência que estavam no telhado desde velhos tempos foi esquecida e elas foram removidas, com o resultado de que o novo telhado foi arrancado durante a primeira tempestade depois da renovação. As aberturas foram recolocadas e não houve mais problemas desde então”.^a Assim descrevem Irminger e Nøkkentved este acidente característico, devido às pressões internas em telhados impermeáveis ao ar (coberturas de cobre, zinco, feltro, etc).

Uma construção, para ser habitável, não pode ser estanque ao ar. Além da sufocação dos usuários, a diferença entre a pressão interna e a externa durante a ocorrência de ventos fortes pode romper alguma parte da construção: portas, janelas, painéis de revestimento de paredes e da cobertura, etc. Se, por exemplo, a

a. IRMINGER, J. O. e NØKKENTVED, C. *Wind-pressure on buildings. Experimental Researches, First Series*, 1930. p. 53.

pressão atmosférica baixar de 770 mm (1027 mbar) para 750 mm (1000 mbar) de mercúrio, e a construção for estanque, surgirá uma sobrepressão interna, em relação à pressão externa (que diminuiu de 20 mm), de cerca de 2700 N/m².

Os mesmos autores acima citados transcrevem uma descrição de Orsted de um tornado americano, em 1838, onde “uma súbita queda na pressão do ar externo causou uma sobrepressão interna tão poderosa que a construção despedaçou-se e fragmentos de tecidos foram encontrados comprimidos em fendas das paredes”.^b

b) 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:

- *normais*: aberturas normalmente existentes: portas, janelas, gateiras, chaminés, lanternins, paredes vazadas, telhas especiais com ventilação, lanternins ventilados, etc;
- *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;
- *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.

c) De um modo geral, 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

b. Ibid., p. 45.

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.).

d) 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 exemplos de tais dispositivos citamos (mais detalhes em 7c):

- cumeeiras com ventilação, em telhados submetidos a sucções para todas as incidências do vento;
- aberturas permanentes nas paredes paralelas à direção do vento e situadas próximo às bordas de barlavento (que são zonas de altas sucções externas);

- aberturas permanentes em toda a periferia, tais como janelas com aberturas permanentes.

CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA

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

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

Esta classificação é um tanto imprecisa, pois, mais do que valores absolutos, interessa a relação entre aberturas em zonas em sobrepessão 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 de abertura dominante.

b) 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 somos obrigados a nos contentar com 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.⁴⁵ Cook²³ indica os seguintes valores, medidos em diversos países:

- Edifícios para escritórios:
 - Canadá (12 edifícios) 0,036 % ± 0,0046 %
 - Estados Unidos (6 edifícios) 0,039% ± 0,0164 %.
- Edifícios para residências:
 - Reino Unido 0,104 %
 - Canadá. 0,038 %
 - Suécia 0,0207 %.
- Paredes internas:
 - Holanda 0,067 % ± 0,015 %.

A determinação deste índice deve ser feita com cautela, lembrando também que alterações importantes na permeabilidade durante a vida útil da construção podem levar a carregamentos mais nocivos que os inicialmente previstos.

c) 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 outras 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. Embora alguns autores façam $N = 2$, adotaremos, como o fazem também Surry e outros,⁵⁵ $N = 1$.

d) Antigamente as normas consideravam ser necessária uma abertura dominante 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, pelo que já foi exposto e pelos resultados a serem apresentados no capítulo 4, conclui-se que 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 (isto é, possuam a permeabilidade normal indicada em 2b).

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. Citamos, 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.

e) A importância de uma abertura dominante é indicada na Figura 2.1. Na Figura 2.1a 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 ($p_i \cong p_{eb}$, sendo p_{eb} a pressão externa a barlavento). 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, próximo a zero. Para o caso da Figura 2.1b, com a abertura dominante na parede de sotavento, a pressão interna será próxima ao valor da pressão externa nesta parede, p_{es} (pressão externa a sotavento). Diminuirão as ações do vento nas paredes laterais e de sotavento (nesta ficará próximo 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 2.1c, 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 (um efeito Venturi invertido), porém com valores intermediários aos dois casos anteriores, e por isso sem interesse prático. Conclui-se, pois, que durante ventos de altas velocidades, para garantir a estabilidade de telhados leves, é conveniente abrir portas e janelas situadas a sotavento. Cuidado para não se enganar e abrir as de barlavento. Seria “pior a emenda que o soneto”. Melhor seria deixar tudo fechado; ou, mesmo, tudo aberto. Obviamente, a parede de barlavento deverá ter condições de resistir a carga do vento, majorada pela sucção interna, que soma, fisicamente, seus efeitos aos da sobrepressão externa nessa parede.

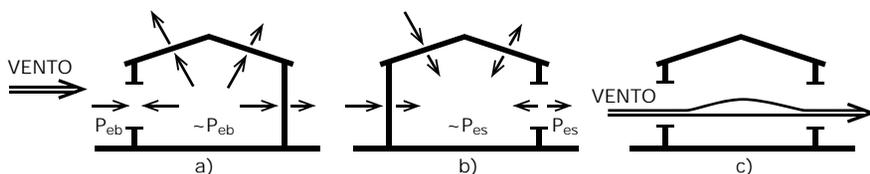


Figura 2.1 – Influência da localização da abertura dominante.

f) Estudos experimentais de Dick – citados por Sexton⁴⁸ – sobre ventilação natural mostraram que a velocidade da passagem de ar através de pequenas aberturas em construções fechadas (isto é, com paredes em todo o contorno) é aproximadamente proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão entre os dois lados de cada uma das pequenas aberturas, $\Delta p_e - \Delta p_i$, sendo:

Δp_e – pressão efetiva no lado externo da abertura;

Δp_i – pressão efetiva no lado interno da abertura.

O estudo teórico simplificado conduz a esse mesmo resultado. Vejamos.

A vazão de massa de ar por uma pequena abertura de área A é dada por, em uma primeira aproximação, por

$$K A \rho V \quad (2.1)$$

sendo:

K – coeficiente de vazão;

ρ – massa específica do ar;

V – velocidade do ar através da abertura:

$$V = (2 |\Delta p_e - \Delta p_i| \rho)^{0,5} \quad (2.2)$$

Como para velocidades do vento de até cerca de 100 m/s, o ar pode ser considerado, com boa aproximação, incompressível ($\rho = \text{constante}$), pode-se trabalhar com a vazão volúmica, Q . A (2.1) ficará

$$Q = K A V \quad (2.3)$$

Para o caso de N aberturas, uma vez estabelecido o equilíbrio, estaremos em regime permanente e o volume de ar que entra na construção será igual ao volume que sai:

$$\sum_{j=1}^N Q_j = 0 \quad (2.4)$$

Em outras palavras, o volume de ar dentro da construção (e também a massa, pois $\rho = \text{constante}$) será constante.

Conforme (2.2) e (2.3), a (2.4) fica

$$\sum_{j=1}^N [\pm K A_j (2 |\Delta p_{e,j} - \Delta p_i| / \rho)^{0,5}] = 0$$

sendo:

A_j – área de uma abertura ou de um conjunto de aberturas para as quais pode ser adotado um mesmo valor de $\Delta p_{e,j}$;
 $\Delta p_{e,j}$ – pressão efetiva externa correspondente à(s) abertura(s) A_j ;

Para um cálculo matematicamente mais preciso será necessário considerar o valor de K em cada abertura. Na prática, tendo em vista a imprecisão inerente ao processo, K pode ser considerado constante. Ter-se-á:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|\Delta p_{e,j} - \Delta p_i|)^{0,5}] = 0 \quad (2.5)$$

resultado este que concorda com os já citados ensaios de Dick.

g) Conhecida a distribuição das aberturas e suas áreas A_j , bem como as pressões efetivas externas $\Delta p_{e,j}$, a pressão interna Δp_i poderá ser calculada pela (2.5).

Quando a pressão dinâmica de referência, q , for única ou assim puder ser considerada, a (2.5) pode ser expressa em função dos coeficientes de pressão externa, c_{pe} , e de pressão interna, c_{pi} , pois:

$$c_{pe} = \Delta p_e / q \quad \text{e} \quad c_{pi} = \Delta p_i / q$$

A (2.5) ficará:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|c_{pe,j} - c_{pi}|)^{0,5}] = 0 \quad (2.6)$$

A experiência mostra que a expressão acima pode ser aplicada também a aberturas maiores (janelas, portas, portões, ventilações, lanternins, etc.), desde que sejam considerados coeficientes de pressão médios nas periferias das aberturas. Estes coeficientes médios, que serão designados por C_e^* e C_i^* , tanto podem ser coeficientes de forma (C_e , C_i) como médias dos coeficientes de pressão (c_{pe} médio) fornecidos por normas ou outras fontes. Teremos, pois:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|C_{e,j}^* - C_i^*|)^{0,5}] = 0 \quad (2.7)$$

Se considerarmos que $C_{e,j}^*$ e C_i^* podem simbolizar também $\Delta p_{e,j}$ e Δp_i , a (2.7) substitui tanto a (2.6) como a (2.5).

h) O duplo sinal nas expressões anteriores deve ser assim interpretado: são positivos os termos do somatório que correspondem a aberturas com entrada de ar ($C_e^* > C_i^*$) e negativos os termos que correspondem a aberturas com saída de ar ($C_e^* < C_i^*$). Isto é, cada termo terá o mesmo sinal da diferença algébrica $C_e^* - C_i^*$.

O cálculo é feito por aproximações sucessivas, arbitrando-se valores de C_i^* . Lembramos que está sendo admitido, em todo este estudo, um valor único da pressão interna.

i) Irmingier e Nøkkentved³⁵ tanto calcularam como mediram os valores de C_i em diversos modelos com aberturas uniformemente distribuídas. Alguns resultados deste estudo são dados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – C_i calculados e medidos. Irmingier e Nøkkentved.

Descrição (vento perpendicular à fachada maior)	C_i	
	Calculado	Medido
modelo 50x50x100 mm; telhado a 20°	-0,33	-0,33
idem, telhado a 45°	-0,34	-0,38
idem, telhado a 60°	-0,36	-0,36
modelo 50x40x70 mm; telhado curvo	-0,28	-0,29
pavilhão industrial	-0,26	-0,26
idem, telhado múltiplo, três tramos	-0,22	-0,22

É de destacar a boa concordância entre a maioria dos valores calculados e medidos. Os ensaios foram feitos em uma corrente uniforme de ar.

j) Pris⁴⁶ calculou o coeficiente de pressão interna em um cubo para diversas situações de aberturas. Para simplificar o cálculo considerou as aberturas uniformemente distribuídas em cada uma das paredes e sempre com a mesma porcentagem de aberturas em todas as paredes. Nestas condições, a soma das áreas das aberturas em cada parede pode ser substituída pela área da respectiva parede, A_p . A (2.6) ficará:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_p (|C_{pe,j} - C_{pi}|)^{0,5}] = 0 \quad (2.8)$$

Para vento incidindo perpendicularmente a uma face do cubo, Pris obteve os seguintes resultados:

- aberturas na face de barlavento: $c_{pi} = +0,76$
- aberturas na face de sotavento: $c_{pi} = -0,28$
- aberturas nas duas paredes laterais: $c_{pi} = -0,65$
- aberturas na parede de barlavento e de sotav.: $c_{pi} = +0,24$

- aberturas nas quatro paredes: $c_{pi} = -0,35$

k) A publicação *Digest 105*, do *Building Research Station*,²⁰ apresenta o cálculo da área de uma abertura (janela) na face de barlavento de um edifício paralelepípedo necessária para que no interior o coeficiente de pressão seja igual a 75 % do coeficiente de forma externo na fachada de barlavento.

As características do edifício são:

- dimensões em planta: 30,00 x 50,00 m;
- altura do pavimento: 3,00 m;
- permeabilidade uniforme de 0,1 % com todas as janelas fechadas.

E as características aerodinâmicas:

- vento perpendicular à fachada maior;
- valores dos coeficientes de forma externos:
 - na fachada de barlavento: $C_e = +0,7$;
 - na fachada de sotavento: $C_e = -0,6$;
 - nas fachadas laterais: $C_e = -0,7$.

De acordo com estas especificações, o coeficiente de pressão interna ($= 0,75 \times 0,7 = +0,525$) será obtido como exposto a seguir.

Em cada uma das duas fachadas maiores (de barlavento e de sotavento) a permeabilidade de 0,1 % corresponde a $3 \times 30 \times 0,001 = 0,09 \text{ m}^2$ de aberturas. E nas fachadas menores, a $3 \times 15 \times 0,001 = 0,045 \text{ m}^2$ de aberturas. Substituindo em (2.7):

$$(X + 0,09) \sqrt{|0,7 - 0,525|} - 0,09 \sqrt{|-0,6 - 0,525|} -$$

$$-2 \times 0,045 \sqrt{|-0,7 - 0,525|} = 0$$

Sendo X a área da janela aberta. Resolvendo esta equação, chega-se a $X = 0,376 \text{ m}^2$.

Portanto, basta que uma pequena folha de janela de 0,32 x 1,20 m esteja aberta na zona em que $C_e = +0,70$ para que a pressão interna seja 75 % deste valor. Esta abertura corresponde a apenas 0,42 % da área da parede em que se situa.

l) Uma formulação teórica mais precisa mostra que a vazão volúmica de ar através de um pequeno orifício ou fenda é dada pela expressão (pode-se considerar a vazão volúmica no lugar da vazão de massa porque, lembramos, estamos considerando a massa específica constante):

$$Q = K A (\Delta p)^n \quad (2.9)$$

sendo :

K – coeficiente de vazão ;

A – área do orifício ou fenda;

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

Portanto:

$$Q = K A (|\Delta p_e - \Delta p_i|)^n \quad (2.10)$$

O valor de K varia com a posição da passagem de ar e mesmo seu valor médio varia de construção a construção. Resultados obtidos por Shaw – e citados por Davenport²⁵ – para valores médios e variação de K são os seguintes:

- Edifícios altos: $K = 0,018 \pm 0,010 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$
- Escolas: $K = 0,043 \pm 0,018 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$
- Supermercados: $K = 0,081 \pm 0,056 \text{ m/s (kPa)}^{-0,65}$

O expoente 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. Diversos autores^{25,24,53} sugerem que se considere n = 0,65 (medidas em construções reais indicam valores entre 0,5 e 0,8).

De acordo com a (2.10), em uma zona j de uma construção, a vazão volúmica de ar pode ser expressa por

$$Q_j = \pm K A_j (|\Delta p_e - \Delta p_i|)^n \quad (2.11)$$

sendo:

A_j – soma das áreas dos pequenos orifícios e/ou fendas existentes em uma zona da construção para a qual possa ser considerado um Δp_e médio, representativo das pressões externas nesta zona, a qual pode ser uma face inteira da construção;

\pm – é necessário distinguir entre ar que entra (+) e ar que sai (-) da construção, conforme visto em 2h.

Quando for atingido um estado de equilíbrio entre ar que entra e ar que sai da construção (regime permanente), e considerando, como é usual, K constante em toda a construção, ter-se-á:

$$\sum_{j=1}^N Q_j = \sum_{j=1}^N [\pm A_j (|\Delta p_{e,j} - \Delta p_i|)^n] = 0 \quad (2.12)$$

sendo:

N – 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 (ou face, conforme comentado acima).

Para $n = 0,5$, a (2.12) coincide com a (2.5). Para $n = 0,65$:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|\Delta p_{e,j} - \Delta p_i|)^{0,65}] = 0 \quad (2.13)$$

Em ambos os casos a pressão interna, Δp_i , é considerada a mesma em todo o interior da construção.

De acordo com o exposto em 2g, se for adotada a mesma pressão dinâmica, q , para cálculo de todos os coeficientes $c_{pe} = \Delta p_e/q$ e $c_{pi} = \Delta p_i/q$ (e, conseqüentemente, o mesmo q para todos os coeficientes integrados C_e e C_i), ter-se-á:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|C_{e,j}^* - C_i^*|)^{0,65}] = 0 \quad (2.14)$$

m) Davenport²⁵ simplifica o problema considerando as incertezas inerentes à determinação de K, sendo que “mesmo seus valores médios variam consideravelmente de construção a construção”. Por isto sugere que a pressão interna seja calculada por uma lei mais simples, linear, na qual a pressão interna é obtida por média ponderada, em relação às áreas das aberturas, das pressões externas. Isto é, deve-se fazer, na (2.12), $n = 1$ e considerar os valores algébricos dos termos do somatório:

$$\sum_{j=1}^N A_j (\Delta p_{e,j} - \Delta p_i) = 0$$

$$\sum_{j=1}^N A_j \Delta p_{e,j} - \sum_{j=1}^N A_j \Delta p_i = 0$$

Como Δp_i é considerado constante:

$$\Delta p_i = \frac{\sum_{j=1}^N A_j \Delta p_{e,j}}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (2.15)$$

Se a pressão dinâmica de referência for a mesma em todas as áreas A_j , chega-se a

$$C_i^* = \frac{\sum_{j=1}^N A_j C_{e,j}^*}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (2.16)$$

Exemplos numéricos, comparando os três critérios ($n = 0,5$; $0,65$ e 1) serão dados no Apêndice A. Pelo critério de Davenport a pressão interna é obtida diretamente, sem necessidade de um cálculo iterativo.

ENSAIOS: PERMEABILIDADE DAS PAREDES

a) Irminger e Nøkkentved,³⁵ 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:

- em uma construção permeável ao ar a pressão interna pode ser substancialmente diferente da pressão atmosférica.
- 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.
- 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: c_{pi} sem alteração;
 - aumento de 50% a barlavento: c_{pi} passou de -0,32 para -0,26;
 - aumento de 100% a barlavento: c_{pi} passou de -0,32 para -0,20.

b) Em ensaios feitos na Universidade de Melbourne, Austrália,⁵⁹ com modelo de pavilhão industrial, a pressão interna máxima foi obtida com apenas 10% de aberturas na parede de barlavento: $c_{pi} = +0,73$.

D'Havé^{26,27} realizou pesquisas muito elucidativas para determinar a influência da percentagem de aberturas na pressão interna. Utilizou modelos cúbicos com $a \cdot b \cdot h = 200$ mm; a cobertura era horizontal ou a duas águas planas, inclinação de 30°. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 3.1.

c) D'Havé conclui que a pressão interna no telhado é pouco influenciada pela percentagem de aberturas, a partir de 5%. Como a pressão no interior pouco varia para construções deste tipo (a não ser para permeabilidades se aproximando de 100%, em geral), a mesma conclusão vale, aproximadamente, para a pressão interna em seu conjunto.

d) Newberry⁴⁴ estudou a pressão interna em um edifício de escritórios de 15 pavimentos. Durante fortes ventos as janelas da parede de barlavento estavam geralmente fechadas. A pressão interna era razoavelmente uniforme, com valores próximos ao da pressão externa a sotavento. A pressão interna sofria apenas uma variação muito pequena ao se abrirem janelas a sotavento. Porém, grandes e rápidas alterações se uma janela na fachada de barlavento fosse aberta e a porta da sala respectiva estivesse fechada. Estas alterações, dentro da sala, eram devidas à ação das rajadas e quase do mesmo valor das alterações das pressões externas.

Tabela 3.1 – Vento normal à fachada.
Valores de c_{pi} na parte interna da cobertura.

Modelo	Parede permeável	% de abertura*			
		5	25	50	100
cúbico, com cobertura plana	a de barlavento	+0,81	+0,88	+0,90	+0,83
	a de sotavento	-0,40	-0,40	-0,38	-0,35
	a lateral (uma)	-0,54	-0,55	-0,57	-0,56
cúbico com telhado a 2 águas inclinação 30°	a de barlavento (vento normal à cumeeira)	+0,74	+0,86	+0,91	+0,95
	a de sotavento (vento normal à cumeeira)	-0,37	-0,37	-0,36	-0,31**
	a lateral (vento paralelo à cumeeira)	-0,58	-0,59	-0,60	-0,59

* para 0% : $c_{pi} = 0$

** valor médio; medido -0,30 na água de barlavento e -0,32 na de sotavento

e) Testes muito interessantes foram feitos por Haddon,³⁰ cujos resultados aparecem na Figura 3.1. Esta figura, tirada do trabalho de Haddon, apresenta duas curvas. A curva 1 dá o coeficiente de pressão interna, c_{pi} , em função da localização de uma porta lateral (6,6% da área da respectiva parede), para vento incidindo axialmente. A abcissa é a distância do eixo da abertura até a fachada de barlavento. Este gráfico é praticamente igual ao perfil de sucção externa na parede lateral, vento também axial. Ou seja: a sucção interna é igual à sucção externa na zona da abertura.

A curva 2 mostra o variar da sucção interna para a porta em uma posição fixa, com seu eixo a 1,6 cm da fachada de barlavento, variando a profundidade do modelo. Vento também axial. Os valores extremos encontrados por Haddon foram:

- $c_{pi} = +0,75$ para vento axial e porta na fachada de barlavento;
- $c_{pi} = -0,85$ para vento axial e porta na parede lateral, na posição fixa da curva 2 .

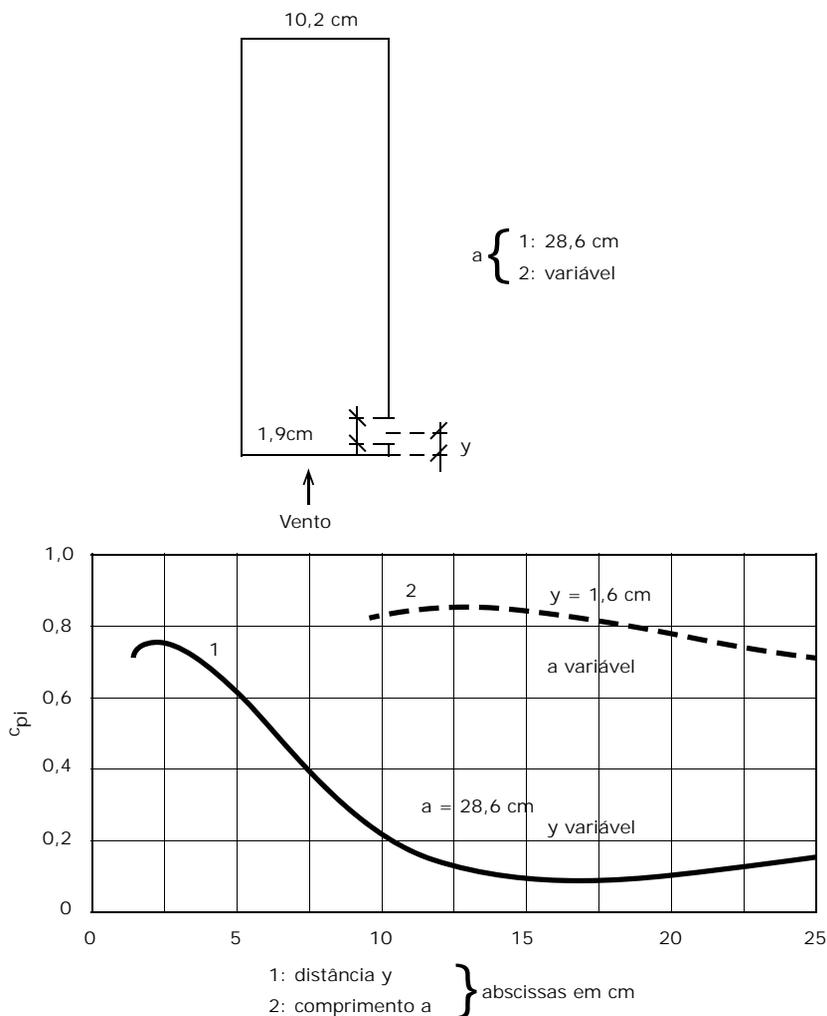


Figura 3.1 – Pressão interna, com uma abertura na parede lateral. Ensaios de Haddon.

f) Também nos ensaios que fizemos para a projetada cúpula do Hotel Tropical de Manaus⁸ verificamos este fato: a pressão interna era aproximadamente a média das pressões externas nas bordas da abertura, em nosso caso um portão com área frontal igual a 3,13 % da área da superfície externa da cúpula. Isto

aconteceu com qualquer posição do portão, quer em zona de sobrepressões, quer em zona de sucções externas.

g) Em ensaios com cúpulas de flecha f e diâmetro do círculo da base d , afastada esta base do solo de uma distância h , apoiadas sobre pilares ou sobre paredes com ou sem portões,^{13,14,15} obtivemos os valores apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Pressões no interior de uma cúpula.

Cúpula		Variação de c_{pi} nos modelos sobre pilares sem parede	c_{pi} máximo nos modelos com paredes	
f/d	h/f		1 portão a barlavento (0°)	2 portões opostos alinhados (0°) ou quase alinhados com o vento (15°)
1/8	1/2	-0,31 a +0,29	+0,50	+0,25 (0°)
	1	-0,25 a +0,43	+0,76	+0,24 (15°)
1/4	1/4	-0,21 a +0,27	+0,57	+0,24 (0°)
	1/2	-0,30 a +0,16	+0,79	+0,19 (15°)

1 portão: 4,2% da área da superfície da parede cilíndrica.

Nos modelos sobre pilares, em cada um deles obtivemos simultaneamente sucções e sobrepressões em seu interior, sendo que as sucções apareceram na zona de barlavento e as sobrepressões na de sotavento.

Com dois portões opostos alinhados ou quase alinhados com o vento apareceram sobrepressões internas e não sucções. Isto se deve a um efeito Venturi invertido.

ENSAIOS: LANTERNINS

a) Lanternins fechados causam influências de dois tipos sobre as pressões externas:

- se o vento incide perpendicularmente à cumeeira, o lanternim provoca um aumento de pressões a barlavento da mesma. Este aumento de pressões é especialmente importante nos casos de altas sucções – telhados curvos e a duas águas de pequena inclinação – sendo favorável à estabilidade do telhado, por diminuir a força de sustentação.
- por outro lado, ensaios realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS em modelos de galpões industriais com cobertura curva e lanternim de grandes dimensões, praticamente fechado, mostraram o aparecimento de três efeitos nocivos, para vento incidindo obliquamente à cumeeira:
- pequeno aumento do pico de sucção na cobertura;

- aumento considerável das sucções em zonas extensas do telhado situadas a sotavento do lanternim, principalmente para vento incidindo a 45°, 60° e 75° com a cumeeira. O efeito mais nocivo se fez sentir com vento a 60°, caso em que quase todo o lanternim ficou submetido a sucções com c_{pe} acima de 1,00, em valor absoluto. O pico de sucção atingiu o valor 2,37;
- na água de sotavento mais de metade do telhado ficou submetido a sucções acima de 1,00, com pico de 2,80 (em valores absolutos).

Mais detalhes sobre estes ensaios podem ser vistos na bibliografia.¹²

b) Outros ensaios realizados neste mesmo Laboratório (LAC) em modelos de pavilhões industriais com coberturas a duas águas planas inclinadas de 10° e 15°, com lanternins de proporções usuais, mostraram que neste caso o lanternim influi menos na distribuição das pressões sobre a cobertura. O aumento da altura do lanternim diminuiu as pontas de sucção na cobertura, mas no próprio lanternim em geral estas pontas aumentaram significativamente. Para zonas restritas do lanternim, c_{pe} médio (usado para o cálculo de ações locais) chegou a -2,9 (no modelo mais alongado, com $a \cdot b \cdot h = 4 \times 1 \times 0,5$, telhado inclinado de 15°, $\ell/h = 0,20$, sendo ℓ a altura do lanternim).

Para maiores detalhes, consultar referências.^{40,41,49,50}

c) Os lanternins abertos são favoráveis à estabilidade do telhado e às vezes também à ventilação interna. Eles podem influir de dois modos diferentes na pressão interna. Se a forma do telhado é tal que o lanternim fica na esteira, ele praticamente não modifica o fluxo e, conseqüentemente, não altera as pressões externas. A pressão interna será aproximadamente a média das pressões externas nas bordas do lanternim (Figura 4.1a). Isto na ausência de abertura dominante.

Por outro lado, se o lanternim estiver na região de fluxo aderente, este é alterado pela presença do lanternim. Inclusive, se não houver demasiada obstrução por venezianas, o fluxo passa pelo interior do lanternim quase que livremente, sendo estrangulado e acelerado (Figura 4.1b). A pressão interna será uma sucção maior que a sucção externa nas suas bordas.

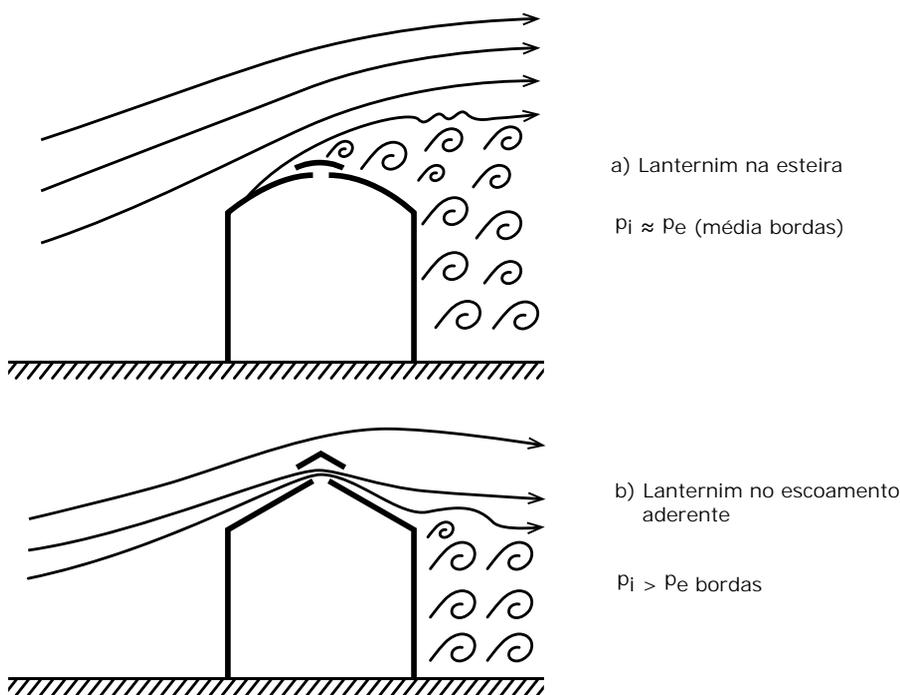


Figura 4.1 – Lanternins abertos.

d) São clássicos os ensaios de Irminger e Nøkkentved,³⁶ de cuja obra extraímos as Figuras 4.2 e 4.3.

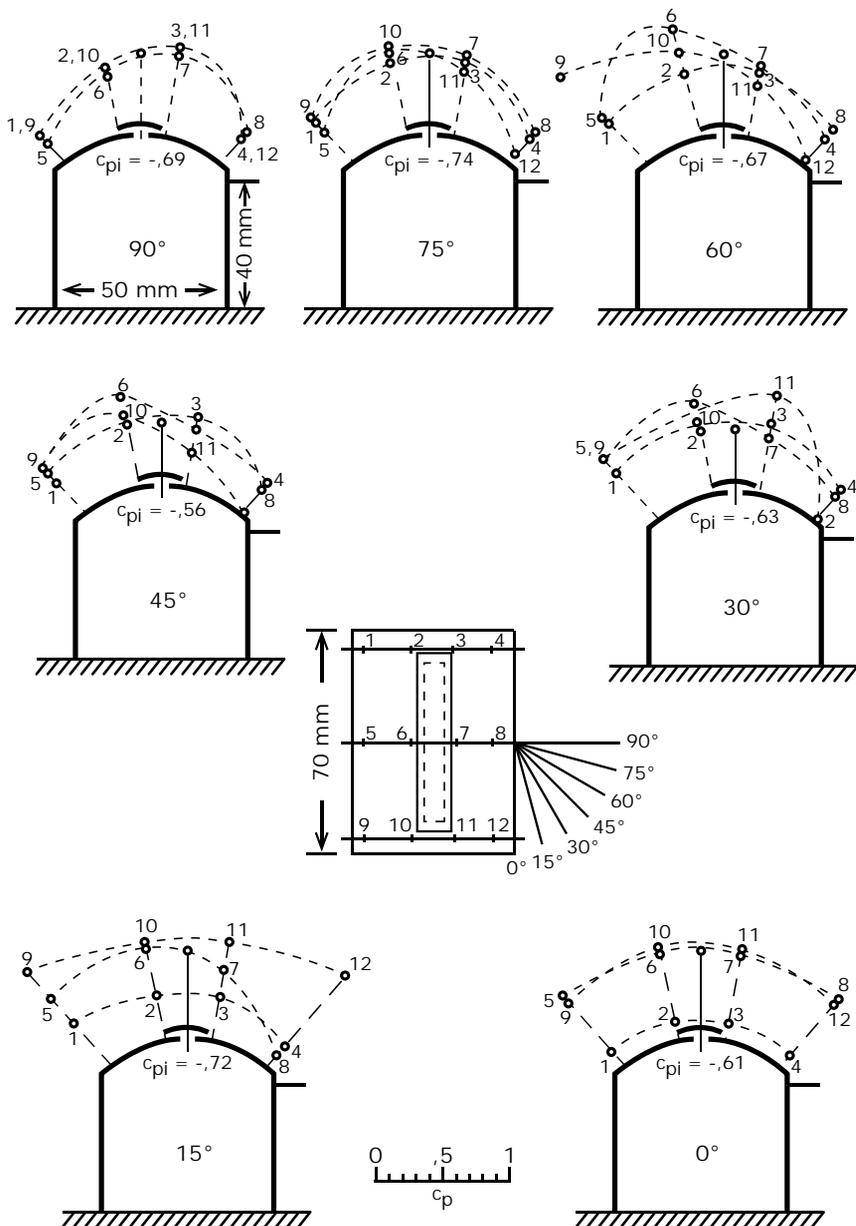


Figura 4.2 – Pressão interna e externa em telhado curvo com lanternim. Ensaios de Irminger e Nøkkentved.

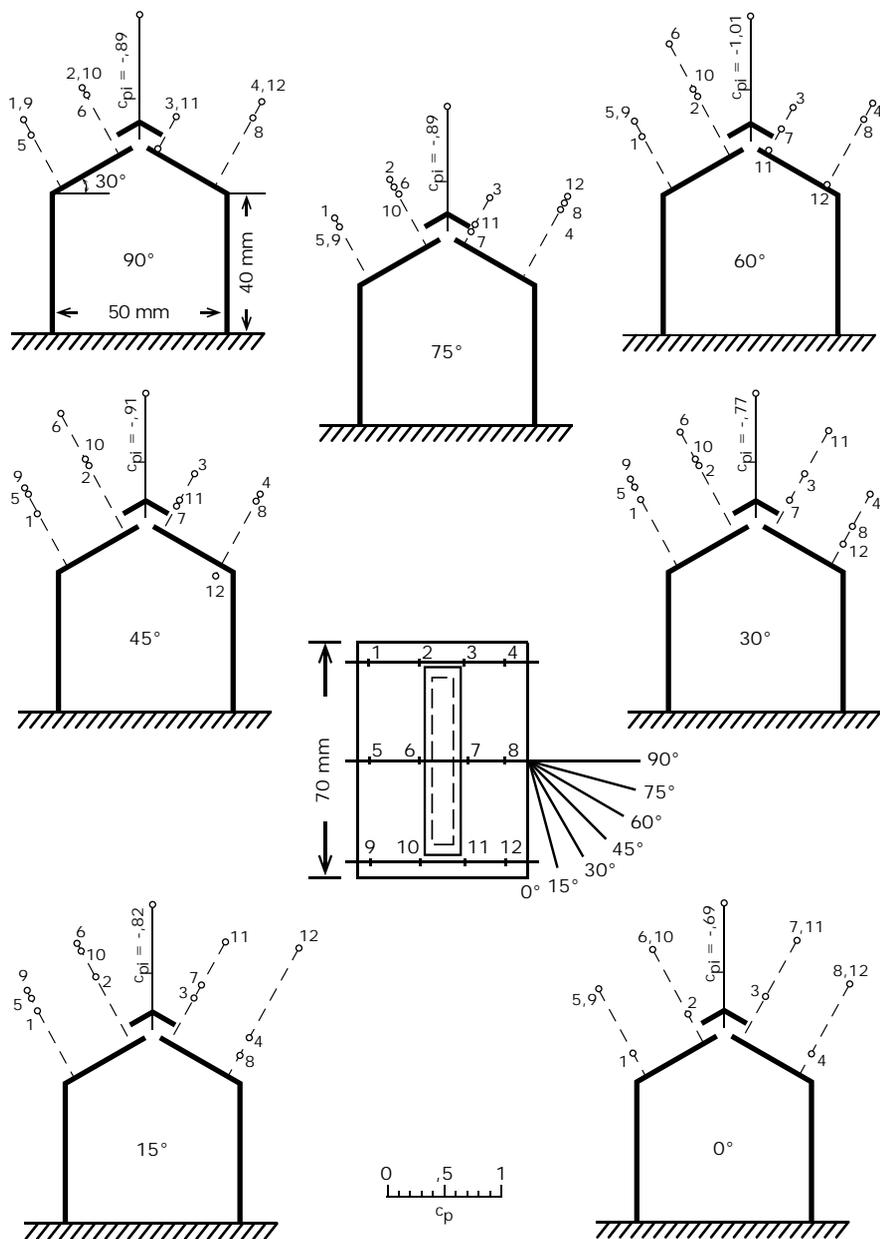


Figura 4.3 – Pressão interna e externa em telhado a duas águas com lanternim. Ensaios de Irmingier e Nøkkentved.

No caso da Figura 4.2 (e Figura 4.1a) o lanternim não perturba o escoamento externo. A pressão interna é a média das pressões externas nas bordas do lanternim. No caso da Figura 4.3 (e Figura 4.1b) aproxima-se da média nas bordas só para vento axial (0°), caso em que o lanternim pouco altera a forma do escoamento externo. Nas outras orientações temos uma sucção bastante superior à média das pressões externas nas bordas.

e) Whitbread e Packer⁵⁸ realizaram ensaios muito elucidativos sobre a influência de um pequeno lanternim nas pressões internas de um prédio escolar, de proporções semelhantes às de um pavilhão industrial. Dimensões do modelo e do lanternim aparecem na Figura 4.4.

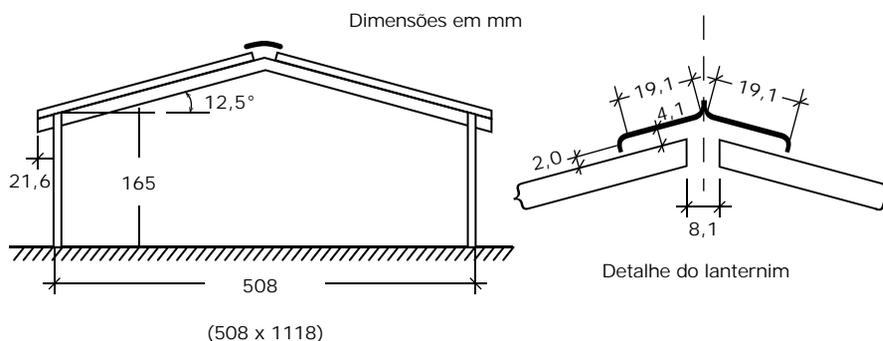


Figura 4.4 – Modelo com lanternim.

Os ensaios foram feitos com diferentes percentagens de aberturas, situadas só na parede de barlavento, ou só na de sotavento ou em ambas. As pressões internas e externas foram medidas no plano transversal mediano. Foram usados dois perfis de vento: vento uniforme, com velocidade de 18,3 m/s (66 km/h); e vento gradiente com velocidade no topo da parede $\bar{V}_{z_0} = 14,6$ m/s (53 km/h). Estas foram também as velocidades de referência para calcular os coeficientes de pressão e forças de sustentação. Utilizaram só vento normal à parede maior, uma vez que testes preliminares mostraram, que com esta orientação obtinha-se a

maior sustentação na superfície externa do telhado (a rigor, o máximo foi obtido entre 10° e 20°, porém muito pouco maior ao correspondente a 0° – vento normal à parede maior). Testes adicionais mostraram que aumentando a abertura do lanternim para o dobro não se constatou mudança apreciável nas pressões internas.

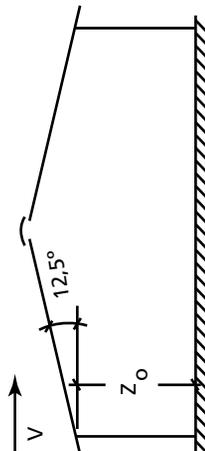
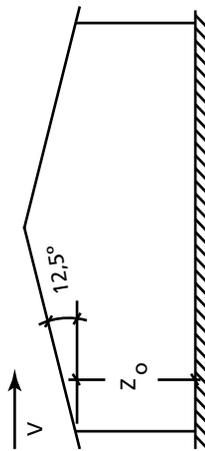
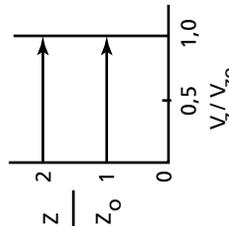
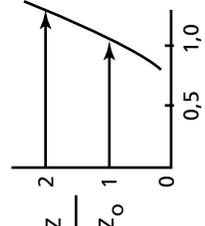
f) Na Tabela 4.1 apresentamos um resumo dos valores do coeficiente de pressão interna, com e sem lanternim, para os dois perfis de vento. Observe-se, no pavilhão sem lanternim, que com apenas 3,33 % de aberturas (em uma ou duas paredes) já estamos em geral bastante próximos (em um caso até superamos) dos valores obtidos com 14,45 % de aberturas. Isto não é válido para o caso de perfil de vento uniforme e aberturas em duas paredes.

Esta observação confirma os resultados de D'Havé,^{26,27} que não encontrou alteração sensível nas pressões internas a partir de 5 % de aberturas (ver 2c), Aliás, Whitbread e Packer informam que “não foi encontrada alteração significativa nos c_{pi} para valores da permeabilidade acima de 1 %”^c (sem lanternim).

Para aberturas a barlavento e a sotavento, sem lanternim, apareceram sobrepressões no interior. Isto parece contrariar os resultados de Irminger e Nøkkentved (ver 3a), que encontraram sucção interna para aberturas mais ou menos uniformemente disseminadas. Não esquecer, porém, que neste caso havia aberturas nas quatro paredes, e não apenas em duas. As duas paredes laterais, paralelas ao vento, são submetidas a sucções. Teremos então três paredes em região de sucção externa e uma em região de sobrepressão externa. No final obteremos sucção no interior.

c. WHITEBREAD, R. E. e PACKER, M. A. Wind-tunnel tests to determine the effectiveness of a ridge ventilator for alleviating the wind loading on a light-weight roof. Teddington, National Physical Laboratory, Aerodynamics Division, 1963, p. 5. (NLP Aero Report, 1077).

Tabela 4.1 – Valores de c_{pi} – Ensaios de Whitbread e Packer.

Perfil do Vento	% de abertura da parede						
		Só a barlavento	Só a sotavento	Ambas	Só a barlavento	Só a sotavento	Ambas
	0	0	0	0	0	0	
	0,34	-	-	+0,11	-	+0,11	
	1,11	+0,57	-0,18	+1,14	-0,18	+0,35	
	3,33	+0,61	-0,18	+0,16	+0,25	-0,07	
	14,45	+0,67	-0,22	+0,25	+0,61	-0,27	+0,16
	0	0	0	0	0	0	
	1,11	+0,48	-0,22	+0,10	-0,21	-0,25	
	3,33	+0,47	-0,23	+0,10	+0,15	-0,29	-0,13
	14,45	+0,44	-0,26	+0,12	+0,39	-0,29	+0,03

Em todos os testes de Whitbread e Packer em modelo sem lanternim, as pressões na superfície externa do telhado foram sucções que variaram entre $c_{pi} = -1,6$ (na borda de barlavento) e $-0,3$ (na borda de sotavento).

As pressões obtidas com os dois perfis de vento foram quase iguais, sendo que com vento gradiente as sucções na superfície de barlavento do telhado foram levemente menores e na superfície de sotavento levemente maiores do que as obtidas com vento uniforme. Porém o coeficiente de sustentação foi o mesmo nos dois casos: $C_s = 0,78$.

g) O lanternim provocou uma pequena alteração na distribuição das pressões externas em sua vizinhança, mas uma alteração importante nas pressões internas, principalmente quando não há aberturas nas paredes. Neste caso, c_{pi} passou de 0 para $-0,51$ (vento uniforme) e para $-0,55$ (vento gradiente). Os coeficientes de sustentação são, respectivamente, $C_s = 0,21$ e $0,13$, contra $0,78$ no caso sem lanternim.

Com 14,45 % de aberturas a influência do lanternim nas pressões internas é pequena. Porém, na sustentação é ainda bastante benéfica. Isto é explicado pelos autores “pelo fato de que com altos valores de permeabilidade o processo de ventilação é invertido, de modo que a sucção na face superior do telhado, nas vizinhanças do lanternim, foi reduzida por efeitos internos.”^d Com vento gradiente C_s foi menor do que com vento uniforme; em geral em torno de $0,1$ menor, às vezes $0,2$ ou, raramente, $0,3$. Na Figura 4.5, obtida a partir de gráficos do trabalho que estamos comentando, pode-se ver perfeitamente a influência benéfica do lanternim na sustentação.

h) Resumindo o que foi exposto sobre as pesquisas de Whitbread e Packer, transcrevemos parte das conclusões apresentadas:

d. WHITEBREAD, R. E. e PACKER, M. A. Op. cit., p. 5.

- 1º – Variação de c_{pi} sem lanternim, variando a permeabilidade das paredes:
de -0,2 a +0,6 – perfil de vento uniforme;
de -0,25 a +0,45 – perfil de vento gradiente.
- 2º – Os valores extremos anteriores foram conseguidos com aproximadamente 1 % de permeabilidade, ou na parede de barlavento, ou na de sotavento, respectivamente, para um vento normal à parede de barlavento.
- 3º – O lanternim testado foi efetivo na redução da pressão interna até 15 % de permeabilidade das paredes, com o resultado de que as forças de sustentação foram grandemente reduzidas para pequenos valores de permeabilidade (isto é, 0 a 5 %) O lanternim foi progressivamente menos efetivo para valores mais altos de permeabilidade, até que com 15 % as pressões internas não foram afetadas pelo lanternim. As forças de sustentação, entretanto, ainda foram mais baixas do que as do telhado sem lanternim.^e

Observe-se que o lanternim é muito pequeno; propriamente, trata-se de uma cumeeira com ventilação.

i) Diversos pesquisadores, estudando modelos de edificações dotadas de lanternins abertos (e permeabilidade zero nas paredes), verificaram a existência de sucções praticamente uniformes no interior da edificação, com valores do coeficiente de pressão interna, c_{pi} , tanto maiores, em módulo, quanto maiores as sucções externas no contorno do lanternim. Citamos:

- Seiferth.⁴⁷ Modelo de gasômetro com lanternim $c_{pi} = -0,50$;
- Flachsbart.²⁸ Modelo de gasômetro com lanternim $c_{pi} = -0,50$;
- Arnstein e Klemperer.¹ Modelo de hangar, com oito chaminés de ventilação $c_{pi} = -0,60$;
- Eiffel. Modelo de hangar, conforme citação de Irminger e Nøkkentved³⁶ $c_{pi} = -0,80$;
- Blessmann.¹¹ Modelo de cúpula hemisférica $c_{pi} = -1,10$.

e. WHITEBREAD, R. E. e PACKER, M. A. Op. cit., p. 6.

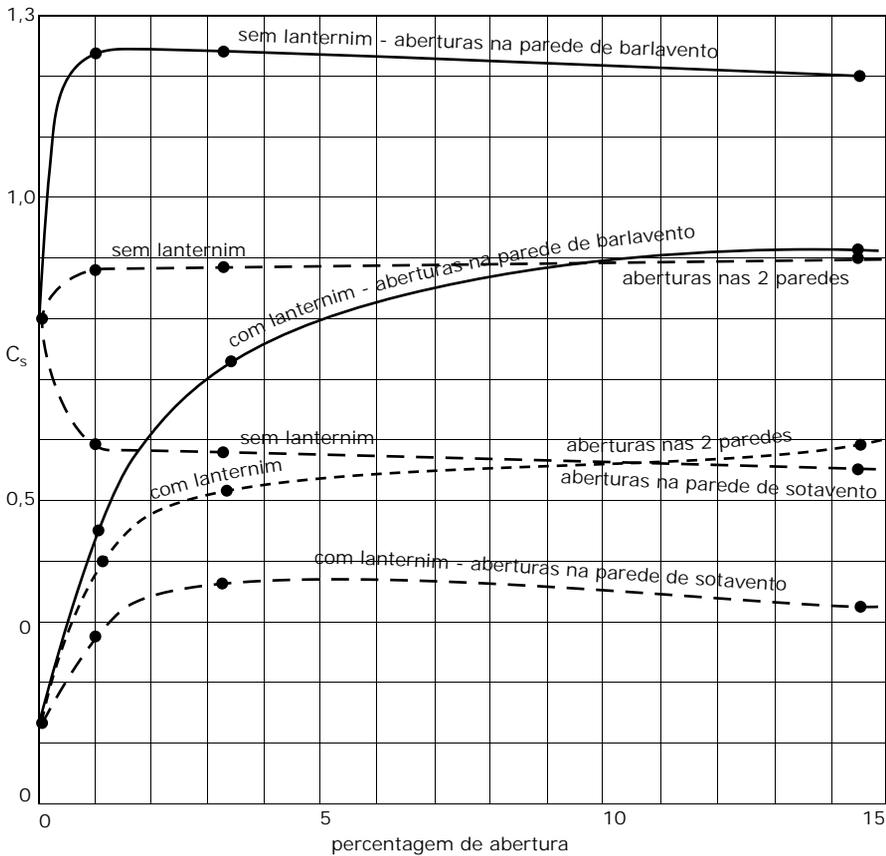


Figura 4.5 – Variação de C_s com porcentagem de abertura em 1 ou 2 paredes. Vento gradiente. Ensaios de Whitbread e Packer.

j) Devido à importância do tema, procuramos estudar a influência de um lanternim e de aberturas nas paredes de um tipo de edificação diferente dos até aqui tratados.¹⁰ Foram feitos ensaios em um modelo de um ginásio coberto, com a cobertura constituída por uma parte tronco-cônica, poliédrica, com 24 faces e inclinação de 15° e por uma parte cônica-poliédrica com o mesmo número de faces e mesma inclinação, formando um lanternim com uma abertura livre de 1,00 m de altura em todo o contorno, como pode ser visto na Figura 4.6.

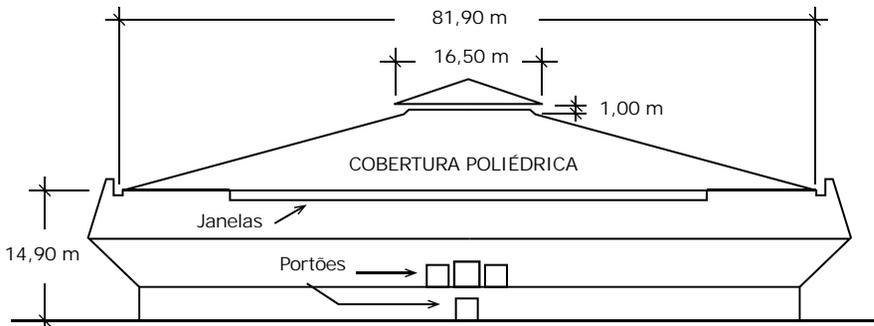


Figura 4.6 – Vista frontal do ginásio.

Devido ao grande número de faces e pequenas dimensões no modelo, o cone poliédrico do lanternim foi substituído por um cone, recoberto com areia de granulação adequada à simulação de escoamento em regime supercrítico. Na cobertura principal (parte tronco-cônica) foram reproduzidas as nervuras existentes nas intersecções das faces planas da edificação real.

Foi simulado um vento natural com um expoente da lei potencial de velocidades médias $p = 0,23$, que corresponde a um terreno com rugosidade situada entre as Categorias III e IV da Norma Brasileira NBR 6123, edição 1988⁶. No topo do modelo as características da componente longitudinal da turbulência são as seguintes: intensidade $I_1 = 12,5 \%$ e escala $L_1 = 160 \text{ mm}$.

k) Consideraremos aqui apenas os resultados obtidos com as seguintes situações de coberturas (ver Figura 4.6):

- abertura contínua entre o lanternim e cobertura principal, com 1,00 m de altura e uma área de $39,3 \text{ m}^2$. Esta abertura estava completamente aberta ou completamente fechada;
- abertura dominante: o conjunto de aberturas situadas somente na zona em sobrepressões externas, e constituído por:
 - quatro portões, em dois níveis, com área total de $21,0 \text{ m}^2$;
 - as janelas situadas na zona em sobrepressão de um cilindro equivalente, estendendo esta zona até os pórticos mais próximos. Isto é, as janelas abertas estendiam-se

de $+37,5^\circ$ a $-37,5^\circ$, sendo 0° o ponto de estagnação. Área destas janelas: $54,0 \text{ m}^2$.

Os ensaios foram feitos admitindo os portões sempre abertos e as janelas com três porcentagens de abertura: 100 %, 50 % e 0 %.

A Figura 4.7 mostra a influência considerável da porcentagem de aberturas das janelas e do lanternim. A área da abertura do lanternim é igual a 52 % da área da abertura dominante e 73 % da área das janelas abertas; por sua vez, a área destas janelas é 2,6 vezes a área dos portões.

Os ensaios confirmaram o efeito benéfico de um lanternim aberto na estabilidade da cobertura e de sua estrutura de apoio, por diminuir a sustentação. A maior sustentação foi obtida com lanternim fechado. Abrindo-se o lanternim, o coeficiente de sustentação na cobertura principal diminui em cerca de 0,20 para qualquer porcentagem de janela aberta, de 0 % a 100 %.

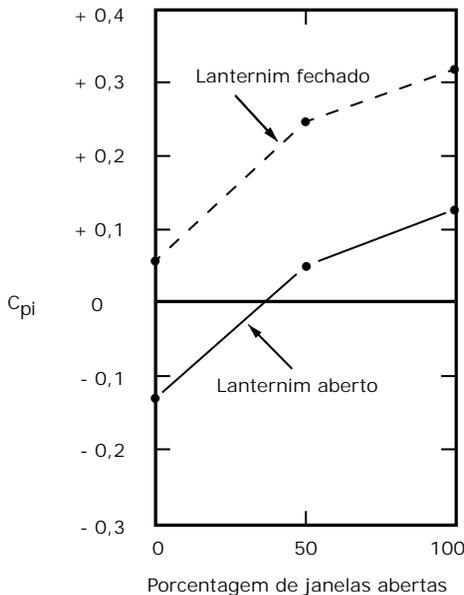


Figura 4.7 – Variação de c_{pi} na cobertura principal.

VARIAÇÕES TEMPORAIS DA PRESSÃO INTERNA

a) Um problema que tem despertado a atenção de pesquisadores nos últimos anos é o referente a variações nas pressões internas. Estas variações podem ser causadas tanto por flutuações nas pressões externas (turbulência do ar incidente, flutuações na esteira ou nas partes laterais da construção) como pelo aparecimento súbito de novas aberturas (abertura voluntária ou acidental de portas e janelas, por exemplo).

A velocidade de propagação das ondas de pressão dentro da construção é igual à velocidade de propagação do som no ar (cerca de 340 m/s, em condições normais de pressão e temperatura). Em outras palavras, as pressões internas apresentam uma correlação espacial muito boa, o que faz com que as variações espaciais da pressão interna possam ser desprezadas. Vejamos como considerar as variações temporais.

b) Liu e Saathoff^{38,39} estudaram, teoricamente, o caso em que uma abertura tal como uma porta ou janela é subitamente aberta durante um vento forte. Admitem estes autores que uma janela é subitamente aberta a barlavento, em um instante $t = 0$, sendo V a velocidade de referência do vento, p_e e p_i ($<p_e$) respectivamente as pressões absolutas externa e interna neste instante (Figura 5.1).

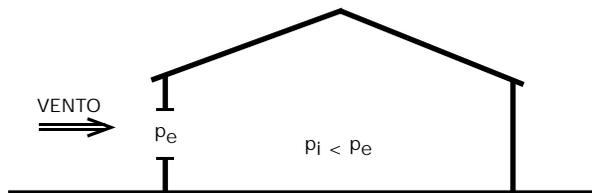


Figura 5.1 – Abertura súbita a barlavento. Pressões iniciais.

Logo após a abertura súbita da janela, p_i aumentará, enquanto que p_e permanece a mesma. Usando a equação de Bernoulli para escoamento incompressível permanente e a equação da continuidade, e admitindo uma transformação adiabática, os autores chegaram à seguinte expressão aproximada para o intervalo de tempo Δt necessário para que a pressão interna atinja o valor da pressão externa:

$$\Delta t = C \ln \frac{1 + \sqrt{1 - Y_o}}{1 - \sqrt{1 - Y_o}} t_o \quad (5.1)$$

sendo:

$$C = 1 / [k(k-1)(p_e/q) (p_a/p_e)^{1/k}]^{0,5}; \quad (5.2)$$

$$Y_o = (p_i/p_e)^{(k-1)/k} \quad (5.3)$$

$$t_o = V^*/(A V) \text{ (constante de tempo);} \quad (5.4)$$

k – expoente da transformação adiabática ($k = 1,4$);

p_a – pressão atmosférica (Pa);

q – pressão dinâmica; $q = \rho V^2 / 2$, em Pa, sendo ρ a massa específica do ar;

V^* – volume interno da construção (m^3);

A – área efetiva da abertura (m^2);

V – velocidade de referência do vento incidente (m/s).

Substituindo k por seu valor numérico:

$$C = 1/[0,560 (p_e/q)(p_a/p_e)^{0,714}]^{0,5} \quad (5.5)$$

$$Y_o = (p_i/p_e)^{0,286} \quad (5.6)$$

C independe da pressão interna. E como a pressão dinâmica q é proporcional ao quadrado da velocidade V , conclui-se que C é proporcional a V . Consequentemente, como Y_o pouco varia, Δt será aproximadamente proporcional à velocidade V .

À primeira vista pode parecer paradoxal que o tempo para se equilibrarem as pressões interna e externa (por alteração apenas da pressão interna) seja proporcional à velocidade. Entretanto, lembrando as definições de c_{pe} e c_{pi} :

$$c_{pe} = \Delta p_e/q \text{ e } c_{pi} = \Delta p_i/q$$

sendo:

c_{pe} – o coeficiente de pressão externa médio na zona da abertura, chega-se a

$$\Delta p_e = c_{pe}q \text{ e } \Delta p_i = c_{pi}q$$

A diferença de pressões a ser equilibrada é

$$p_e - p_i = (p_a + c_{pe}q) - (p_a + c_{pi}q) = (c_{pe} - c_{pi})q = (c_{pe} - c_{pi}) \rho V^2/2$$

diferença esta que, portanto, aumenta com o quadrado da velocidade do vento.

A variação de p_i e de p_e (e, portanto, de Y_o) é pequena, pois as pressões efetivas Δp_e e Δp_i são muito pequenas em presença de p_a : Y_o será sempre um valor próximo à unidade.

A (5.5) pode ser escrita em função de V . Basta substituir q por $\rho V^2/2$. Para condições normais de pressão e temperatura, $q = 0,614V^2$ e $p_a = 101300$ Pa:

$$C = V / [0,914 p_e (101\ 300/p_e)^{0,714}]^{0,5} \quad (5.7)$$

c) Exemplifiquemos com o seguinte caso:

- condições normais de pressão e temperatura;
- $c_{pe} = +1,0$ e $c_{pi} = -0,5$
- $V = 50$ m/s.

Queremos calcular o tempo para que p_i se torne igual a p_e (ou para que c_{pi} se torne igual a c_{pe}). Teremos:

$$\begin{aligned} q &= 0,613 (50)^2 = 1532 \text{ Pa} \\ p_e &= 101300 + 1,0 \times 1532 = 102832 \text{ Pa} \\ p_i &= 101300 - 0,5 \times 1532 = 100534 \text{ Pa} \\ C &= 50 / [0,914 \times 102832 (101300/102832)^{0,714}]^{0,5} = 0,1640 \\ Y_o &= (100534/102832)^{0,286} = 0,9936 \\ \Delta t &= 0,1640 [\ln (1 + \sqrt{1-0,9936}) / (1 - \sqrt{1-0,9936})] t_o \\ \Delta t &= 0,0263 t_o \rightarrow \Delta t = 2,6\% \text{ de } t_o \end{aligned}$$

Vemos, pois, que em um vento extremamente forte, com velocidade de referência de 50 m/s, o intervalo de tempo necessário para a pressão interna passar de -0,5 a +1,0, é de apenas 2,6 % da constante de tempo.

Mesmo no caso bastante raro de $c_{pi} = -1,0$ e $c_{pe} = +1,0$, ter-se-á, ainda com $V = 50$ m/s:

$$\Delta t = 0,0305 t_o \rightarrow \Delta t = 3,05\% \text{ de } t_o$$

Conforme constataram Liu e Saathoff, Δt normalmente fica entre 1 % e 3 % de t_o . A Tabela 5.1 apresenta valores de $\Delta t/t_o$ para $V = 30\text{m/s}$ e 50m/s , em condições normais de pressão e temperatura.

Tabela 5.1 – Valores de $\Delta t/t_o$ em condições normais de pressão e temperatura.

V (m/s)	Valores de $\Delta t/t_o$ para $c_{pi} =$	
	-0,5	-1,0
30	0,0079	0,0110
50	0,0263	0,0305

d) Valores de t_o para algumas construções, com $c_{pi} \geq -1,0$ e $c_{pe} = +1,0$ aparecem na Tabela 5.2. Exemplo de cálculo:

- Construção com $a \cdot b \cdot h = 10 \times 10 \times 3 \text{ m} = 300 \text{ m}^3$,
 $V = 50 \text{ m/s}$ e $A = 1 \text{ m}^2$:
 - $t_o = 300/(1 \times 50) = 6\text{s}$ e $\Delta t \leq 0,03 \times 6$; $\Delta t \leq 0,2\text{s}$.
 - Idem, com $A = 6\text{m}^2$:
 - $t_o = 300/(6 \times 50) = 1\text{s}$ e $\Delta t \leq 0,03 \times 1$; $\Delta t \leq 0,035\text{s}$.

Tabela 5.2 – Valores de t_o e de Δt em condições normais de pressão e temperatura, com $c_{pe} = +1,0$ e c_{pi} até $-1,0$.

V (m/s)	Volume da construção (m ³)	Área da abertura (m ²)	$t_o =$ (s)	$\Delta t \leq$ (s)
30	300	1	10	0,1
		6	1,7	0,02
	8000	1	267	2,9
		12	22	0,2
50	300	1	6	0,2
		6	1	0,03
	8000	1	160	4,8
		12	13	0,4

e) Portanto, exceto para o caso de uma pequena abertura em um grande pavilhão, a pressão interna iguala a pressão externa na zona da abertura de barlavento em menos de três segundos; em

geral, em menos de um segundo. Isto é, as rajadas externas são transmitidas para o interior muito rapidamente, a não ser para o caso de pequenas aberturas em pavilhões de grandes dimensões. Como as rajadas mais rápidas consideradas no projeto dos elementos estruturais são de três segundos, isto significa que, na prática, a pressão interna acompanha a pressão externa.

Esta conclusão está de acordo com a de Vickery e outros⁵⁷ de que as deflexões de uma construção podem ser tratadas como *quasi-estáticas*, isto é, as deflexões são proporcionais à carga do vento em cada instante de tempo. Estes autores mostraram que podem aparecer fortes interações entre a dinâmica da construção e a pressão interna no caso de grandes vãos em construções ultra leves, principalmente em construções infladas. Em construções com estruturas convencionais esta interação só pode aparecer quando sua flexibilidade for fora do normal. Na quase totalidade dos casos em que a pressão interna é definida por uma abertura dominante basta considerar para fator de rajada da pressão interna o mesmo fator considerado para as pressões externas. Estes autores definem abertura dominante como aquela abertura (situada, no caso em estudo, em zona em sobrepressão externa) cuja área é igual ou maior a duas vezes a área total das pequenas aberturas nas zonas em sucção.

De acordo com a norma brasileira NBR 6123⁶ este critério equivale a considerar, no cálculo da pressão interna, um parâmetro S_2 correspondente à Classe A (edificações com a maior dimensão da fachada até 20 m – rajada de três segundos).

f) Após alcançar o mesmo valor da pressão externa, a pressão interna continua crescendo, por efeito de inércia, até um certo valor, originando-se uma oscilação amortecida da pressão interna. De um modo simplificado, considerando a construção rígida e com apenas uma abertura a barlavento, estamos em presença de um ressonador de Helmholtz. A frequência de oscilação das pressões internas (frequência de Helmholtz, f_H) será calculada por:

$$f_H = 60,7 A^{0,25} V^{*0,5}$$

Para os exemplos anteriores ter-se-á:

- $V^* = 300 \text{ m}^3$:
 - $A = 1 \text{ m}^2$, $f_H = 3,5 \text{ Hz}$
 - $A = 6 \text{ m}^2$, $f_H = 5,5 \text{ Hz}$
- $V^* = 8000 \text{ m}^3$:
 - $A = 1 \text{ m}^2$, $f_H = 0,7 \text{ Hz}$
 - $A = 12 \text{ m}^2$, $f_H = 1,3 \text{ Hz}$

A frequência fundamental da estrutura de pavilhões industriais comuns e de seus componentes situa-se acima de 3 Hz. Conseqüentemente, pavilhões pequenos, como o primeiro dos exemplos acima, caem nesta gama e podem, teoricamente, funcionar como um ressonador de Helmholtz.

Estas oscilações da pressão interna podem ser causadas tanto por uma abertura súbita como pelas flutuações do próprio vento (rajadas), quando houver uma abertura dominante a barlavento. Entretanto, convém não esquecer que o ressonador de Helmholtz é rígido e com apenas uma abertura a barlavento (permeabilidade das demais faces é zero), o que não acontece na quase totalidade das construções. Nestas, tanto a estrutura como o revestimento são flexíveis. Além disso, há “vazamentos” em virtude da permeabilidade da construção. Estas características aumentam o amortecimento e fazem com que, na prática, não apareça este problema, exceto para o caso de uma súbita grande abertura em uma construção relativamente rígida.³² Reproduzimos a conclusão do trabalho de Liu e Fartash:³⁷

Medidas de campo limitadas tendem a indicar que a grande permeabilidade e as paredes e/ou coberturas flexíveis das construções comuns geram amortecimento suficiente para evitar a ressonância de Helmholtz, embora apareçam grandes flutuações das pressões internas quando existirem grandes aberturas nas construções.

Quanto a estas flutuações internas, já vimos que elas acompanham, na prática, as flutuações das pressões externas. Convém aqui citar Stathopoulos e Luchian,⁵⁴ que fizeram ensaios em um modelo rígido e sem permeabilidade, com uma abertura súbita a barlavento:

Os dados experimentais foram úteis para indicar que a alteração súbita da pressão interna não é maior que a correspondente aos picos de flutuações (das pressões externas). As construções sempre têm uma permeabilidade inerente que tende a diminuir, ainda mais, os picos transitórios da pressão interna. Flexibilidade da capa externa da construção é outro fator que não foi considerado neste estudo.

É esperado que a sobrecarga transitória seja mais reduzida em uma construção real. Em vista do exposto, parece não haver necessidade de considerar, no projeto estrutural, o caso de uma abertura súbita, desde que os coeficientes de pressão interna correspondam a valores de pico do vento.

Nas conclusões, os autores apresentam o seguinte:

“O estudo teórico, baseado na equação de Bernoulli para escoamento isentrópico não permanente, indica um aumento dos picos transitórios da pressão interna quando aumenta a área da abertura na parede de barlavento e diminui o volume interno e/ou a velocidade do vento.

Picos de pressão interna medidos em condições de escoamento permanente sempre foram maiores que os picos transitórios detectados no presente estudo. Portanto, pode ser concluído que não é necessário incluir alterações súbitas de aberturas no projeto se são utilizados os valores instantâneos de pico das pressões internas”.

Estes valores “instantâneos” de pico vêm a ser os valores correspondentes a rajadas de curta duração. Em geral, três segundos. Este intervalo de tempo corresponde, na norma brasileira, à Classe A de edificações, conforme já comentado em 5e. Maiores detalhes serão dados no estudo comparativo dos valores de c_{pi} calculados por diversos critérios (Apêndice A).

NORMAS

a) Vejamos os valores apresentados por algumas normas, antigas e atuais. Iniciemos com a norma brasileira NB 5, 1943.³ Não fala especificamente em pressão interna. A única indicação, implícita, em que parece considerar pressões internas, aparece nas especificações para cálculo de tetos de construções abertas. Define como construção aberta toda construção que tenha, ou possa ter, em um dos lados, aberturas que ocupem pelo menos a terça parte da respectiva área. Esta indicação aparece no artigo 10 – Sucção – item b:

- para os tetos de construções abertas $C = 1,2$.

b) Norma brasileira NB 5, 1961⁴

Artigo 10:

O coeficiente de forma interno é função da situação da abertura em relação à direção do vento e é igual a:

- em superfícies planas, cheias, de construções abertas a barlavento: $C_i = + 0,5$;
- em superfícies planas, cheias, de construções abertas a sotavento ou em planos paralelos à direção do vento: $C_i = - 0,5$.

Quando a sobrepressão ou a sucção interna tiver, em cada face da estrutura, efeito contrário ao da externa, deve-se considerar separadamente o efeito de cada uma delas.

c) Norma uruguaia UNIT – Norma 50, 1948³⁴

- C 4 – A separação em sucção e sobrepressão deve ser feita geralmente em estruturas com telhados curvos e em construções com vãos interiores superiores a 15 m.
- D 12 – Nos casos em que se deva fazer a separação de sobrepressões e sucções, segundo o estabelecido em C4, deve-se levar em conta não somente a ação *exterior* do vento, mas também o *estado interno* da construção, que provocará, por efeito da diferença de pressão entre seu interior e a pressão estática exterior, a aparição de cargas uniformes sobre todas as superfícies (paredes e tetos), dirigidas para fora ou para dentro, conforme o interior se encontre em sobrepressão ou depressão.
- D 14 – O estado de pressão interna é função da magnitude das aberturas permanentes ou involuntárias e de sua posição com respeito à direção do vento.
Em todos os casos existe diferença entre a pressão interna e a atmosférica, já que o recobrimento permite a circulação de ar em grau maior ou menor, através das juntas de portas e janelas, de chaminés, ventiladores (lanternins), juntas no material de revestimento, etc. Aconselha-se tomar os seguintes valores:
- D 14a – Construções nominalmente herméticas, com portas e janelas que mesmo fechadas permitem

certa permeabilidade através de numerosas aberturas pequenas:

$$C_i = \begin{matrix} -0,20 \\ +0,40 \end{matrix}$$

D 14b – Construções com 30% ou mais de superfície de parede aberta ou que pode estar normalmente aberta:

$$C_i = \begin{matrix} -0,40 \\ +0,80 \end{matrix}$$

D 14c – Construções com uma percentagem de aberturas compreendidas entre 0 e 30% , interpolar-se-á linearmente entre os valores anteriores.

A pressão interna assim determinada deve superpor-se, como se disse, à ação exterior do vento, para qualquer sentido deste em construções nominalmente herméticas, ou em sentido adequado quando exista falta de simetria nas aberturas.

d) Norma alemã DIN 1055, Blatt 4³¹

- parede de barlavento aberta $c_{pi} = +0,8$;
- parede de sotavento ou laterais abertas $c_{pi} = -0,4$.

Estes valores não aparecem explicitamente na norma alemã, mas foram obtidos por Hempel por interpretação dos valores globais dados na norma. A norma alemã define como construção aberta (a rigor não fechada: *nichtgeschlossene baukorper*) a que tem um ou mais lados completamente abertos ou que podem ser abertos; ou a construção em que no mínimo um terço é aberto ou pode ser aberto em um ou mais lados.³⁶

e) Norma belga NBN 460.03, 1960³³

Apresentamos um resumo do que esta norma especifica, com algumas explicações adicionais.

Construção ou parte de construção estanque ao vento: não há nenhuma abertura nas paredes ou telhado e os materiais que

os constituem não deixam passar o ar, seja por falta de juntas, seja por falta de porosidade.

Parede ou telhado com n % de aberturas: se tem aberturas cuja soma das áreas representa n % de sua área total, ou se possui uma porosidade ao ar equivalente.

Parede ou telhado com grandes aberturas: percentagem de aberturas atinge ou pode atingir 33 %.

Construções de tipo corrente em que o telhado é a duas águas planas simétricas ou em terraço:

1º A construção é efetivamente estanque ao vento.

Todas as paredes e telhado têm uma permeabilidade nula ao vento e nenhuma abertura, mesmo acidental, pode aparecer. Este caso é excepcional.

$$C_i = 0.$$

2º Construção não estanque ao vento, mas nenhuma das paredes ou telhado apresenta percentagem de aberturas superior a 6 %.

$$C_i = \pm 0,30.$$

3º As paredes ou telhado apresentam uma percentagem de aberturas entre 6 % e 33 %.

Os valores de C_i obtêm-se por interpolação linear entre os valores de mesmo sinal do 2º e 4º caso.

4º Uma das paredes ou telhado tem ou pode ter em certos momentos, mesmo que acidentalmente, uma percentagem de aberturas igual ou superior a 33 %, enquanto que as outras só têm pequenas aberturas e, portanto, são obstáculos ao escoamento do ar.

Adota-se para C_i o mesmo valor de C_e na parede em questão, se a construção for efetivamente estanque ao vento nas demais paredes e telhado.

Portanto, para abertura em:

- fachada de barlavento $C_i = +0,8$;
- fachada de sotavento ou laterais $C_i = -0,5$;
- água do telhado de sotavento ou paralela ao vento $C_i = -0,5$;
- água do telhado de barlavento – depende da inclinação.

5º Lanternim ao longo da cumeeira de telhado simétrico a duas águas planas.

Se o lanternim é aberto dos dois lados:

$$C_i = -0,5 (1 + \ell/a)$$

ℓ – comprimento do lanternim

a – comprimento da construção

Se o lanternim não é aberto dos dois lados, caímos em um dos casos precedentes.

f) Norma suíça SIA – Normes Techniques 160, 1970⁵¹

Estão transcritas, em parte, nas normas canadenses⁴² e estadunidenses.¹ Apresenta as pressões internas para diversas formas de construções e para diversos ângulos de incidência do vento, sem indicar uma lei geral que abranja um grande número de casos, como o fazem, por exemplo, a norma francesa e a brasileira. Eis alguns dos valores da norma suíça:

Para o caso de um pavilhão com lanternim, a sucção interna chega a -0,9, para relação entre as dimensões $a \cdot b \cdot h = 8 \cdot 4 \cdot 1$ vento incidindo a 45° com as paredes.

Em uma edificação de relação entre as dimensões $a \cdot b \cdot h = 1 \cdot 1 \cdot 2,5$, a sucção interna chega a -0,8, com vento incidindo a 15° com a parede onde se situa a abertura dominante.

Para *edifícios-torres de grande comprimento*, a norma suíça apresenta uma tabela bem detalhada (Tabela 6.1). Esta tabela mostra a grande variação de pressão interna em função do ângulo de incidência do vento e da localização da abertura dominante. O ângulo de incidência do vento (α) é o ângulo definido pela direção do vento e pelo eixo longitudinal da edificação.

g) Norma francesa NV, 1946²⁹

As especificações desta norma são aplicáveis a construções correntes, definidas como aquelas que satisfazem as seguintes condições: a/b entre 0,10 e 2,5; altura inferior a 25 m.

- Construções sem aberturas ou com pequenas aberturas uniformemente repartidas.

Tabela 6.1 – Pressão interna em edifícios de grande comprimento.⁵¹

Coeficiente C_{pi} para	α						
	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
aberturas uniformemente distribuídas, cobertura estanque	+0,10	0	-0,10	-0,15	-0,20	-0,25	-0,30
aberturas muito preponderantes na face de barlavento	+0,85	+0,80	+0,65	+0,50	+0,25	-0,05	-0,45
aberturas muito preponderantes na face de sotavento	-0,40	-0,45	-0,50	-0,55	-0,60	-0,60	-0,45
aberturas muito preponderantes na face lateral	-0,45	-0,90	-0,85	+0,35	+0,65	+0,80	+0,85
edifício estanque; aberturas de ventilação uniformemente distribuídas na cobertura	-0,45	-0,60	-0,65	-0,80	-1,00	-0,60	-0,30

Aplica-se simultaneamente sobre todas as faces interiores de todos os compartimentos:

- seja uma sobrepressão com $C_i = +0,3$;
- seja uma sucção com $C_i = -0,3$.

Não transcrevemos os valores dados para as chamadas ações locais, porque na realidade se trata de um artifício desta norma para não alterar os coeficientes externos. E, na realidade, são os coeficientes externos os alterados por altas sucções locais, como já expusemos em outros trabalhos.^{9,8}

- Construções com grandes aberturas.

A parede é considerada aberta se tem partes abertas ou que possam ser abertas (normal ou acidentalmente) de modo a se ter mais de um terço da superfície exterior da parede aberta.

1º caso – A parede oposta à parede *aberta* é sem aberturas ou tem apenas pequenas aberturas que são obstáculos ao escoamento do ar.

- parede aberta a barlavento $C_i = +0,8$;
- parede aberta a sotavento ou paralela ao vento $C_i = -0,5$;
- construção fechada, mas com telhado com aberturas ou lanternim aberto $C_i = -0,5$.

2º caso – A parede oposta à parede *aberta* é aberta e permite o escoamento do ar.

Calcular-se-ão as partes de paredes ou de construções interiores situadas na corrente de ar como se elas estivessem isoladas no espaço, abstração feita das outras partes da construção.

h) Norma francesa NV, 1976²¹

Apresenta especificações bastante completas para construções em geral, e especificações simplificadas para o que chama de *construções correntes de base retangular*. As características destas *construções correntes* são:

- a base ao nível do solo é um retângulo de dimensões a e b, sendo $a \geq b$.
- a altura h, diferença entre o nível da base da construção e o nível da cumeeira do telhado, é inferior ou igual a 30 m.
- as dimensões devem obrigatoriamente respeitar as seguintes condições:
 - $h/b \geq 0,25$
 - $h/a \leq 2,5$, com a condição suplementar $b/a \leq 0,4$ se $h/b > 2,5$
 - $f \leq h/2$ para os telhados a duas águas planas
 - $f \leq (2/3)h$ para os telhados curvos (f – altura do telhado)
- a cobertura é:
 - seja uma cobertura plana;
 - seja um telhado único de altura f ou a duas águas planas inclinadas no máximo de 40° com a horizontal;
 - seja um telhado curvo no qual o plano tangente à nascente das diretrizes do telhado é inclinado no máximo de 40° e no mínimo de 22° com a horizontal.
- as paredes verticais devem:
 - repousar diretamente sobre o solo;
 - ser planas;
 - apresentar uma permeabilidade inferior ou igual a 5 % ou para uma só delas igual ou superior a 35 %".^f
 - Para as construções que obedecem a estes requisitos, as pressões internas são:
- construções fechadas $C_i = \pm 0,3$;
- construções abertas:
 - abertura a barlavento $C_i = +0,8$;
 - abertura a sotavento ou em parede lateral $C_i = -0,5$.

f. COMMISSION DEL RÈGLES NEIGE ET VENT, Paris. Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions: Règles N. V. 65, Revision 1976. Paris, Société de Difusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, 1976. p. 115.

Como vimos anteriormente, é exagerado o limite de 35 % para considerar a construção como aberta.

i) Norma inglesa do Building Research Station, 1969¹⁹

Esta norma especifica o seguinte:

A pressão interna é condicionada à relativa facilidade da entrada e saída de ar. Para uma construção com muitas aberturas pequenas, tais como lanternins de ventilação e fendas de vazamento em torno de portas e janelas distribuídas em todas as faces e nenhuma abertura isolada dominante, C_i deve ser tomado como o menos favorável de $\pm 0,2$; se há uma abertura dominante, ela preponderantemente controlará o valor de C_i , que pode alcançar um valor extremo que se aproxima do existente do lado de fora da abertura principal.

Portanto, é necessário em tais casos considerar o possível âmbito de pressões internas para diferentes direções do vento e buscar as cargas de cálculo na pior combinação possível de pressões externas e internas.^g

Como vemos, esta norma não dá valores específicos para a pressão interna, mas liga-a à pressão existente externamente na principal (ou principais) abertura. Assim sendo, a pressão interna poderá atingir valores bem próximos de +1,0 (máximo valor positivo de c_p). Basta que tenhamos uma abertura exatamente na zona de sobrepressões máximas. Por exemplo: janelas na caixa de escada de um edifício alteado, na zona onde c_{pe} é igual ou muito próximo de +1,0.

Por outro lado, se uma grande abertura estiver em uma zona de fortes sucções externas, sucção semelhante aparecerá no interior. Serão possíveis, em casos extremos, valores tão altos como 1,2 ou talvez mais ainda (em valor absoluto).

g. BUILDING RESEARCH STATION, Garston. *Wind loading on building-2*. Garston, 1969. p. 5. (Digest, 101)

j) Norma inglesa do Building Research Station, 1970;¹⁸
norma britânica sobre cargas do vento;¹⁷
norma brasileira NB 599⁵

Esta nova edição da norma inglesa apresenta, como guia, valores para C_i obtidos com o critério geral muito bem exposto na edição anterior, porém lá sem dados numéricos:

Com todas as janelas nominalmente fechadas, a permeabilidade de um edifício de moradia ou escritórios provavelmente estará entre 0,01% e 0,05% da área da superfície, dependendo do grau de estanqueidade.

Para uma construção retangular com duas paredes opostas permeáveis e as outras impermeáveis, o valor de C_i deve ser tomado como +0,2 se a direção do vento é normal a uma face permeável ou -0,3 se a direção do vento é normal a uma face impermeável. Se todas as quatro faces são uniformemente permeáveis, $C_i = -0,3$.

Onde a permeabilidade difere de face a face, como quando contém uma abertura dominante, tal como uma porta ou janela aberta (pode ser janela quebrada pela força do vento ou por fragmentos que voam durante uma tempestade), o valor de C_i variará, dependendo das dimensões e posição da abertura em relação às outras permeabilidades. Os seguintes valores servem como guia:

Dimensões e posição de abertura dominante

1º – na face de barlavento:

se a permeabilidade da face de barlavento iguala a seguinte relação com a permeabilidade distribuída total de todas as faces submetidas à sucção (permeabilidade = área das aberturas):

proporção	1	$C_i = +0,1$
	1½.....	+0,3
	2	+0,5
	3 ou mais	+0,6

2º – na face de sotavento:

qualquer abertura dominante: $C_i = -0,3$.

3º – em uma face paralela ao vento:

- i – qualquer abertura dominante não em zona de alto c_{pe} :
 $C_i = -0,4$;
- ii – qualquer abertura dominante em zona de alto c_{pe} : se a área da abertura dominante iguala a seguinte relação com a permeabilidade distribuída em todas as faces sujeitas à sucção:

proporção	$\frac{1}{4}$ ou menos	$C_i = -0,4$
	$\frac{1}{2}$	-0,5
	$\frac{3}{4}$	-0,6
	1	-0,7
	$1\frac{1}{2}$	-0,8
	3 ou mais	-0,9

Onde não é possível ou não é considerado justificado estimar a variação de C_i para uma construção em particular, o coeficiente deve ser baseado em um dos seguintes parágrafos para qualquer determinação de cargas em paredes ou telhado:

- 1º – Onde há apenas uma pequena probabilidade de ocorrer uma abertura dominante durante uma tempestade severa, C_i deve ser tomado como o mais nocivo de +0,2 e -0,3.
- 2º – Para situações onde uma abertura dominante é provável de ocorrer, C_i deve ser tomado como 0,75 do valor de c_{pe} fora da abertura. As condições extremas devem ser determinadas para as diversas direções do vento que dão origem a cargas críticas e deve ser notado que pressões internas, especialmente severas, podem ser desenvolvidas se uma abertura dominante está locada em uma região de altas pressões locais externas.^h

Esta última indicação da NB 599 exige o conhecimento da distribuição das pressões externas para diversas orientações do vento, seja por meio de ensaios específicos, seja por informações de relatórios de pesquisas feitas em modelos de construções com proporções iguais ou próximas da em estudo. Para os casos comuns, parece-nos mais prático a indicação da norma australiana, que será vista no próximo item. Esta norma, para o caso de abertura dominante em parede lateral ou de sotavento, manda adotar C_i (ou c_{pi}) igual ao C_e na zona da abertura. Este C_e já é um valor

h. BUILDING RESEARCH STATION, Garston. *The assessment of wind loads*. Garston, 1970. p. 9-10. (Digest, 119).

médio (para toda a parede ou para uma zona dela, se houver uma variação muito grande de pressões), portanto abaixo das condições extremas citadas na norma brasileira, e a ele não se aplica o coeficiente de redução 0,75. Para o caso de abertura dominante em parede lateral, convém lembrar que as mesmas sucções elevadas indicadas na Tabela 4b da NB 599 para a zona de barlavento da cobertura, vento incidindo paralelamente à cumeeira (Zona EG, $\alpha = 0^\circ$), aparecem também nas respectivas zonas das paredes laterais (ver, por exemplo, *Considerações Sobre Alguns Tópicos Para Uma Norma de Vento*⁹).

k) Norma australiana

A norma australiana⁵² é muito semelhante às citadas no item anterior, porém com valores extremos mais severos, e que nos parecem mais razoáveis. As indicações desta norma são as seguintes (com a numeração original):

"Coeficientes de pressão interna média para edificações de planta retangular e interior aberto" (isto é, se houver repartições internas, elas não são estanques, permitindo um rápido equilíbrio das pressões internas):

6 Duas paredes opostas igualmente permeáveis, as outras paredes impermeáveis:

- a) Vento normal a uma face permeável $C_i = +0,2$;
- b) Vento normal a uma face impermeável. $C_i = -0,3$.

7 Quatro paredes igualmente permeáveis $C_i = -0,3$ ou 0.
(O valor que for mais severo para cargas combinadas).

8 Abertura dominante em uma parede; as outras paredes de igual permeabilidade.

- a) Abertura dominante na parede de barlavento, tendo uma relação de permeabilidade da parede de barlavento para a permeabilidade total das outras paredes e cobertura sujeitos à sucção externa igual a:

- 1 ou menos $C_i = +0,1$;
- 1,5 $C_i = +0,3$;

- 2 $C_i = + 0,5$;
- 3 $C_j = + 0,6$;
- 6 ou mais $C_i = + 0,8$.

- b) Abertura dominante na parede de sotavento: tomar o valor do coeficiente de forma desta parede.
- c) Abertura dominante em parede lateral: tomar o valor do coeficiente de forma desta parede.
- d) Abertura dominante na cobertura: tomar o valor do coeficiente de pressão externa na zona da cobertura em que está situada a abertura dominante (isto é, o valor do coeficiente de forma parcial, para essa zona da cobertura).

9 Uma edificação efetivamente estanque e possuindo janelas que não podem ser abertas..... $C_i = -0,2$ ou 0. (o valor que for mais severo para cargas combinadas).

Notas:

- 1 A pressão interna dentro de uma edificação pode ser positiva ou negativa, dependendo da posição e dimensões das aberturas.
- 2 A permeabilidade de uma superfície é medida pela área total de aberturas na superfície em consideração.
- 3 Como guia, a permeabilidade típica de um edifício de escritórios ou de uma casa com todas as janelas nominalmente fechadas está entre 0,01 e 0,05 por cento da área da parede, dependendo do grau de vedação.
- 4 O valor de C_i pode ser limitado ou controlado vantajosamente por uma distribuição deliberada de permeabilidade nas paredes e cobertura, ou por um dispositivo de ventilação que pode servir como uma abertura dominante em uma posição que tenha um adequado coeficiente de pressão externa. Um exemplo de tal dispositivo é um lanternim em um telhado de pequena inclinação; este, para todas as direções do vento, pode reduzir a força ascensional no telhado.
- 5 Para edificações onde pressurização interna é utilizada, esta pressão adicional deve também ser considerada.

Completando as notas da norma australiana, lembramos que aberturas no telhado influirão nos esforços sobre as paredes consideradas isoladamente se houver comunicação entre sótão e recinto. Por exemplo:

- inexistência de forro: pavilhões industriais, de exposições, etc.;
- forro com aberturas: alçapões, caixas para luzes, etc.;
- forro muito permeável.

Se não há comunicação, estas aberturas na cobertura vão interessar somente ao estudo da estrutura do telhado, seus suportes e sua cobertura.

l) Normas canadenses

As normas canadenses⁴³ apresentam indicações mais resumidas, aplicáveis a edificações de planta retangular:

- Aberturas principalmente na parede de barlavento $C_i = +0,7$;
- Aberturas principalmente na parede de sotavento $C_i = -0,5$;
- Aberturas principalmente nas paredes paralelas à direção do vento $C_i = -0,7$;
- Aberturas uniformemente distribuídas nas quatro paredes $C_i = -0,3$.

Esta norma não apresenta uma definição quantitativa de abertura dominante.

m) Recomendações da CECM²²

As recomendações da CECM²² apresentam o seguinte:

Uma construção é estanque ao vento se suas paredes exteriores não têm qualquer abertura e se os materiais de que são feitas as paredes exteriores não deixam passar o ar, nem por juntas nem por permeabilidade.

Uma parede (ou cobertura) apresenta uma percentagem de abertura μ se ela possui aberturas cuja soma das áreas representa μ % da área total desta parede (ou cobertura) ou se ela possui uma permeabilidade ao ar equivalente.

Os cinco casos previstos nas Recomendações da CECM estão grupados na Figura 6.1 e os valores correspondentes de C_i encontram-se na Tabela 6.2 para diversos ângulos de incidência do vento.

Tabela 6.2 – Coeficientes de pressão interna.²²

Caso (Ver figura 6.1)	Valores de c_i para α igual a			
	0°	90°	180°	270°
1	0			
2	$\pm 0,3$			
3	+0,8	-0,6	-0,4	-0,6
4	+0,8	+0,8	-0,4	-0,4
5	0	-0,4	0	-0,4

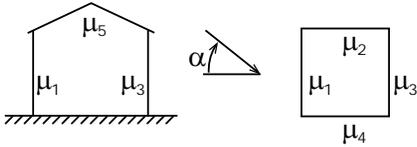
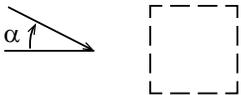
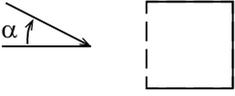
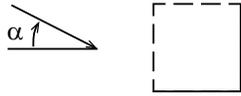
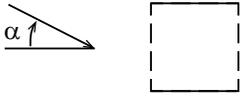
<p>1ª Caso: Construções estanques</p>  <p>$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$</p>	<p>2ª Caso: Aberturas uniformemente distribuidas</p>  <p>$0 < \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 \leq 30 \%$</p>
<p>3ª Caso: Aberturas em uma parede</p>  <p>$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 \geq 3(\mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5) \\ \geq 5\% \end{array} \right\} c_i = c_e$</p>	<p>4ª Caso: Aberturas em duas paredes adjacentes</p>  <p>$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 = \mu_2 \geq 3(\mu_3 + \mu_4 + \mu_5) \\ \geq 5\% \end{array} \right\}$</p>
<p>5ª Caso: Aberturas em duas paredes opostas</p>  <p>$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 = \mu_3 \geq 3(\mu_2 + \mu_4 + \mu_5) \\ \geq 5\% \end{array} \right\}$</p>	<p>Casos intermediários:</p> <p>C_i é obtido por interpolação linear.</p>

Figura 6.1 – Casos de permeabilidade ao ar.²²

n) Norma Brasileira NBR 6123, edição de 1988⁶

Esta norma incorpora indicações da norma australiana. Na transcrição que segue será mantida a numeração original da NBR 6123. No Apêndice A serão comentados os exemplos que aparecem no Anexo D da norma e comparados seus resultados com os obtidos com as outras expressões indicadas no capítulo 2.

6.2 – Coeficientes de pressão interna

6.2.1 – Se a 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 e/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. Enquanto a permeabilidade não ultrapassar os limites indicados em 6.2.3, pode ser admitido que a pressão externa não é modificada pela mesma, devendo a pressão interna ser calculada de acordo com as especificações dadas a seguir.

6.2.2 – Para os fins desta Norma são considerados impermeáveis os seguintes elementos construtivos e vedações: lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria de pedra, de tijolos, de blocos de concreto e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas. Os demais elementos construtivos e vedações são considerados permeáveis.

A permeabilidade deve-se à presença de aberturas tais como: juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhas e telhados, vãos abertos de portas e janelas, chaminés, lanternins, etc.

6.2.3 – O índice de permeabilidade de uma parte da edificação é definido pela relação entre 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 %.

Para aplicação dos itens da secção 6.2, excetuando-se o caso de abertura dominante, o índice de permeabilidade de nenhuma parede ou água de cobertura pode ultrapassar 30 %. A determinação deste índice deve ser feita com prudência, tendo em vista que alterações na permeabilidade, durante a vida útil da edificação, podem conduzir a valores mais nocivos de carregamento.

6.2.4 – Para os fins desta Norma, 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.

6.2.5 – Para edificações com paredes internas permeáveis a pressão interna pode ser considerada uniforme. Neste caso devem ser adotados os seguintes valores, para o coeficiente de pressão interna c_{pi} :

a) Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis:

- vento perpendicular a uma face permeável $c_{pi} = +0,2$
- vento perpendicular a uma face impermeável $c_{pi} = -0,3$

b) Quatro faces igualmente permeáveis

(considerar o valor mais nocivo) $c_{pi} = -0,3$ ou 0

c) Abertura dominante em uma face; as outras faces de igual permeabilidade:

- abertura dominante na face de barlavento.

Relação entre a área de todas as aberturas na face de barlavento e a área total das aberturas em todas as faces (paredes e cobertura, nas condições do item 6.2.4) submetidas a sucções externas:

1	$c_{pi} = + 0,1$
1,5	$c_{pi} = + 0,3$
2	$c_{pi} = + 0,5$
3	$c_{pi} = + 0,6$
6 ou mais	$c_{pi} = + 0,8$

- abertura dominante na face de sotavento.
Adotar o valor do coeficiente de forma externo, C_e , correspondente a esta face (Tabela 4).
- abertura dominante em uma face paralela ao vento.
 - abertura dominante não situada em zona de alta sucção externa.
 - Adotar o valor do coeficiente de forma externo, C_e , correspondendo ao local da abertura nesta face (Tabela 4).
- abertura dominante situada em zona de alta sucção externa.
 - Relação 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:

0,25	$c_{pi} = - 0,4$
0,50	$c_{pi} = - 0,5$
0,75	$c_{pi} = - 0,6$
1,0	$c_{pi} = - 0,7$
1,5	$c_{pi} = - 0,8$
3 ou mais	$c_{pi} = - 0,9$

Zonas de alta sucção externa são as zonas hachuradas nas Tabelas 4 e 5 (c_{pe} médio).

6.2.6 – Para edificações efetivamente estanques e com janelas fixas que tenham uma probabilidade desprezável de serem rompidas por acidente, considerar o mais nocivo dos seguintes valores:

$$c_{pi} = - 0,2 \text{ ou } 0$$

6.2.7 – Quando não for considerado necessário ou quando não for possível determinar com uma exatidão razoável a relação de permeabilidade do item 6.2.5 c, deve ser adotado para valor do coeficiente de pressão interna o mesmo valor do coeficiente de forma externo, C_e (para

incidências do vento de 0° e de 90°), indicado nesta Norma para a zona em que se situa a abertura dominante, tanto em paredes como em coberturas.

6.2.8 – Aberturas na cobertura influirão nos esforços sobre as paredes nos casos de forro permeável (porosidade natural, alçapões, caixas de luz não estanques, etc.) ou inexistente. Caso contrário, estas aberturas vão interessar somente ao estudo da estrutura do telhado, seus suportes e sua cobertura, bem como ao estudo do próprio forro.

6.2.9 – 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:

- cumeeiras com ventilação em telhados submetidos a sucções para todas as orientações do vento, causando uma redução da força ascensional sobre o telhado.
- 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.

6.2.10 – No campo de aplicação da Tabela 9, para o cálculo das forças devidas ao vento na parede de uma edificação cilíndrica, quando esta for de topo(s) aberto(s), devem ser adotados os seguintes valores para c_{pi} :

$h/d \geq 0,3$	$c_{pi} = -0,8$
$h/d < 0,3$	$c_{pi} = -0,5$

6.2.11 – Para casos não considerados nos itens 6.2.5 a 6.2.7 o coeficiente de pressão interna pode ser determinado de acordo com as indicações contidas no Anexo D.

ANEXO D – Determinação do coeficiente de pressão interna

A vazão de ar por uma pequena abertura de área A é dada por

$$Q = K A \rho V \quad (D. 1)$$

sendo:

K – coeficiente de vazão

V – velocidade do ar na abertura: $V = \sqrt{2|\Delta p_e - \Delta p_i|/\rho}$ (D. 2)

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,

$$Q = 0$$

$$\text{Conforme (D. 1) e (D. 2): } \sum_1^n K A \rho \sqrt{2|\Delta p_e - \Delta p_i|/\rho} = 0 \quad (\text{D. 3})$$

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

$$\Delta p_e = C_{pe}Q \quad \text{e} \quad \Delta p_i = C_{pi}Q$$

$$\text{a (D. 3) fica: } \sum_1^n \pm A \sqrt{|C_{pe} - C_{pi}|} = 0 \quad (\text{D. 4})$$

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 nas periferias das aberturas.

Estes coeficientes médios, que serão designados por C_e^* e C_i^* tanto podem ser coeficientes de forma (C_e e C_i) como médias dos coeficientes de pressão, fornecidos nesta Norma ou obtidos em outras fontes.

$$\text{Com esta generalização a (D.4) fica: } \sum_1^n \pm A \sqrt{|C_e^* - C_i^*|} = 0 \quad (\text{D. 5})$$

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 de C_i^* .

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

a) As pressões internas podem variar amplamente, dependendo das dimensões e posição das aberturas. Algumas normas indicam valores muito baixos, enquanto que outras só admitem valores maiores para construções em que uma parede tenha no mínimo 30 ou 35 % de aberturas. Este limite, como mostraram ensaios de D'Havé (3c), Whitbread e Packer (4d), é exagerado. Por via analítica chega-se à mesma conclusão (2k).

A não ser em casos de construções estanques ou quase estanques (caso raro), valores altos podem aparecer dentro da construção. As sobrepressões podem chegar até próximo de +1,0, enquanto que as sucções podem atingir, excepcionalmente, valores tão altos como -1,2, dependendo das dimensões e localização da abertura ou aberturas dominantes.

b) As sobrepressões internas, principalmente quando aliadas a fortes sucções externas, são a causa de diversos acidentes. Alguns já foram descritos em trabalho anterior.⁷ Relembramos, como um dos exemplos mais típicos apresentados, o arrancamento total do telhado (cobertura e estrutura) do clube social da praia do Curumin, no Rio Grande do Sul. Tal arrancamento se deu exatamente quando os vidros da fachada de barlavento não resistiram à sobrepressão do vento e foram rompidos. A sobrepressão interna que então se manifestou, junto com as sucções externas arrancaram o telhado inteiro de sobre as paredes, rapidamente.

Um outro caso bastante interessante aconteceu em um pavilhão industrial no estado de São Paulo, em dezembro de 1970. Tratava-se de um pavilhão 100 x 55 m em planta, telhado curvo, telhas de alumínio (Figura 7.1). O vento incidiu quase axialmente. Na parede de barlavento havia uma abertura entre telhas e alvenaria de cerca de 40 cm, ao longo de toda a parede. Tal abertura não existia nas demais paredes. A parede de barlavento e a de sotavento estavam com os portões abertos ao se iniciar a ventania. No interior deveríamos ter sobrepressões ou sucções, ou ambas, porém de pequeno valor. Como estava entrando muito vento no pavilhão, alguns operários fecharam os portões de barlavento. Ficou, portanto, internamente uma sucção em torno de $-0,4$: grande saída de ar a sotavento (portões abertos) e pequena entrada pela abertura entre telhas e parede de barlavento. Até aí tudo bem, sendo esta situação mais favorável à estabilidade do que a anterior. Porém pouco depois resolveram fechar também os portões de sotavento. Portanto, sobrepressão interna provavelmente entre $+0,4$ e $+0,6$, devido à sobrepressão externa que se comunicou ao interior pela abertura entre telhas e parede. Lembramos que, como consta na Figura 7.1, há um beiral na fachada de barlavento, o que faz com que tenhamos sobrepressões externas na região superior da fachada, onde está a abertura de 40 cm já citada; se não existisse o beiral, teríamos sucções nesta zona, ou sobrepressões muito pequenas.

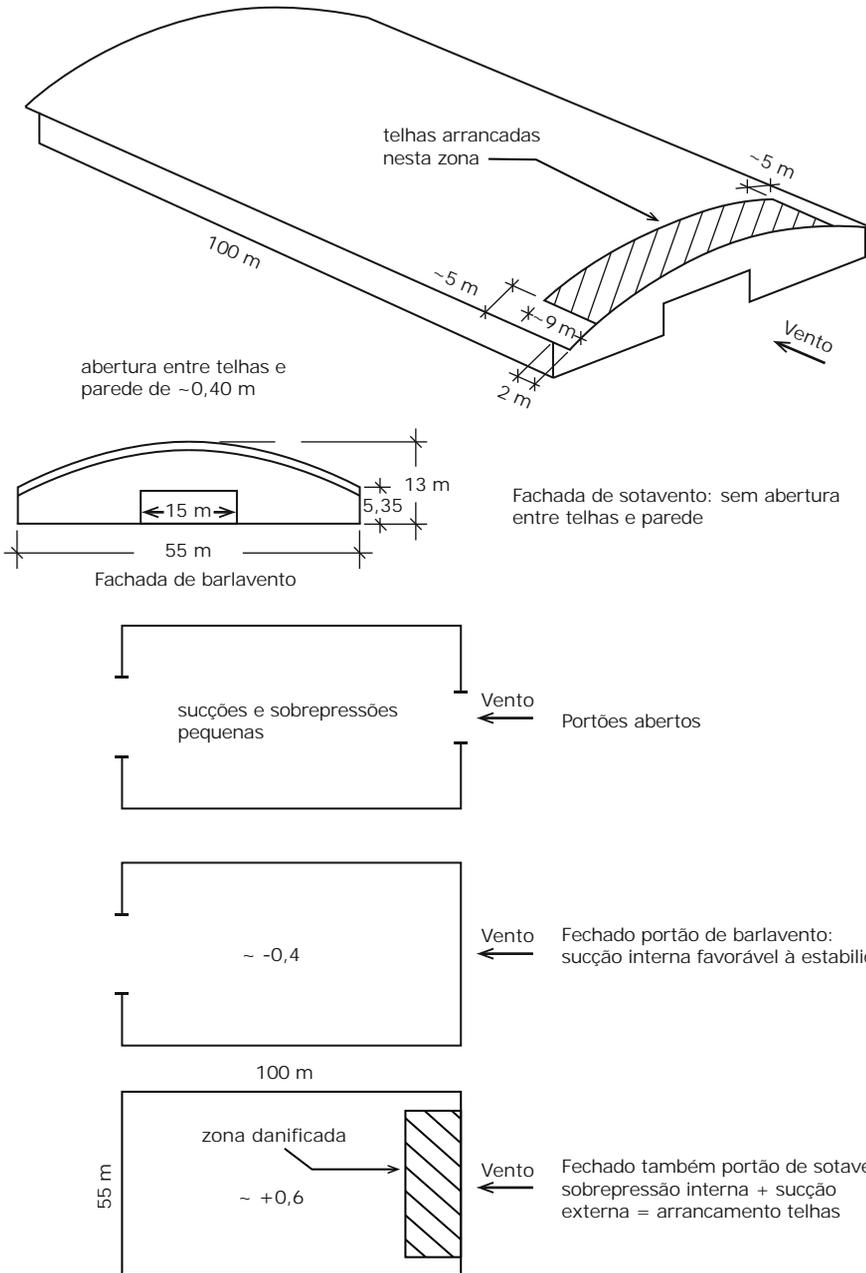


Figura 7.1 – Acidente causado pela pressão interna.

Portanto, quando foram fechados os portões de sotavento, apareceu uma forte sobrepressão interna. Esta, juntamente com o bulbo de sucções externas no telhado (na zona de barlavento), provocou o arrancamento da maioria das telhas em uma faixa de cerca de 9 m, exceto os 5 m inferiores de cada lado.

c) Se fizermos aparecer uma sucção interna, estaremos melhorando as condições de estabilidade do telhado, pois esta sucção vai se opor às externas. Com isto reduzimos a força de sustentação. Isto pode ser conseguido de diversos modos, tais como:

- Colocação de lanternins ou outras aberturas em posições sempre sujeitas à sucção, para qualquer orientação do vento que conduza a altas sucções externas. Para telhado a duas águas planas com inclinação de até cerca de 30° e para telhados curvos usuais, isto pode ser conseguido com lanternim de altura usual com ou sem venezianas, ou com lanternim bem baixo sem venezianas (Figura 7.2a).
- Para telhados de maior inclinação ou para melhorar os resultados nos pouco inclinados, podemos usar lanternins com tampos tipo válvula (Figura 7.2b). Ou, se os ventos dominantes sopram sempre com a mesma ou aproximadamente a mesma orientação, o lado de barlavento pode estar sempre fechado e o de sotavento sempre aberto (Figura 7.2c). Em ambos os casos, quando soprar o vento normal ou quase normal às fachadas maiores, o lanternim estará com seu lado de barlavento fechado. Isto faz baixar também as sucções externas, podendo mesmo transformá-las em sobrepressões, ao menos na parte do telhado próxima à cumeeira, o que mais ainda favorece a estabilidade do telhado.

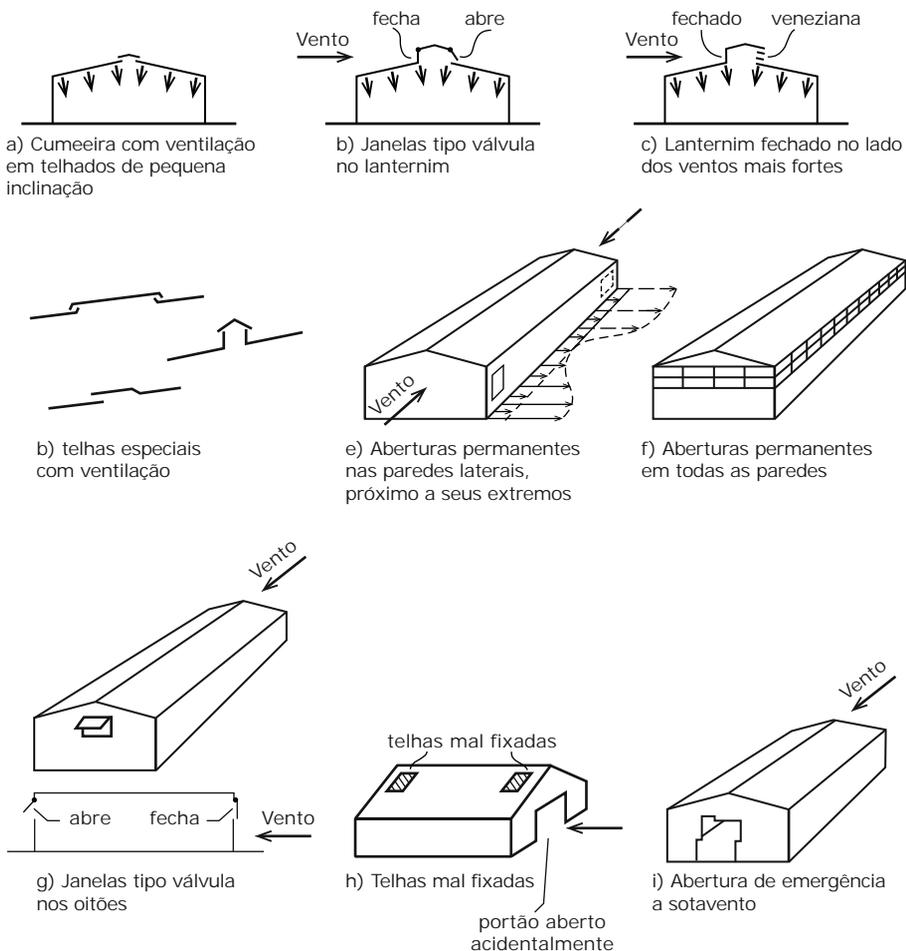


Figura 7.2 – Dispositivos para redução da sustentação.

- Uso de telhas especiais com ventilação (tipo concha, clara-bóia ou chaminé) em telhados de pequena inclinação, de modo que a sucção externa se transmita ao interior pela ventilação (Figura 7.2 d).
- Janelas nas paredes laterais, próximo aos extremos (Figura 7.2e). Haddon,³⁰ por exemplo, em um modelo com relação entre as dimensões $a \cdot b \cdot h = 11,25 \cdot 4 \cdot 2$, obteve $C_i = +0,75$ com vento axial e abertura a barlavento. Ainda

com vento axial, porém abertura na parede lateral, próximo à aresta de barlavento (isto é, nas zonas das maiores sucções), obteve $C_i = -0,85$. Portanto, a alteração da pressão por mudança do local da abertura foi, em módulo, de 1,60. Para uma pressão dinâmica de 82 kgf/m^2 ($V = 130 \text{ km/h}$) isto corresponde a uma força de 131 kgf/m^2 .

- Janelas em todo o contorno (Figura 7.2f).
- Janelas basculantes, tipo válvula, que abram para fora, colocadas nos oitões (Figura 7.2g). A janela de oitão em sobrepressão (de barlavento) fechará e a do oitão em sucção (de sotavento) abrirá. A solução anterior, da Figura 7.2e, quando possível, é superior a esta, pois as aberturas estão em zona de altas sucções externas, enquanto que na última solução as sucções na zona de abertura são menores.
- Aberturas de emergência, em caso de fortes temporais (Figura 7.2i). Thompson⁵⁶ apresenta o caso de um hangar de madeira que foi salvo pelo rápido arrancamento de parte do oitão de sotavento. Um hangar, ao lado, em que não houve tempo de aplicar esta solução, ruiu. Outra solução, como abertura de emergência, é deixar algumas telhas mal fixadas em locais convenientes (Figura 7.2h). Elas serão arrancadas em fortes ventanias, aliviando a sobrepressão interna oriunda, por exemplo, de portões que foram abertos ou arrancados por sobrepressão externa.
- Durante temporais é recomendado deixar as janelas de sotavento abertas.

As soluções correspondentes às Figuras 7.2a até 7.2d são efetivas para vento aproximadamente normal à cumeeira. As soluções seguintes, bem como as 7.2a e 7.2d, são eficazes com vento axial ou oblíquo. Aberturas a sotavento, ou em todo o contorno, evidentemente, sempre são efetivas. Conforme a solução adotada, pode-se ou mesmo deve-se conjugar duas ou mais das sugestões dadas para se ter um bom resultado.

A Figura 7.3 resume alguns valores de normas para c_{pi} .

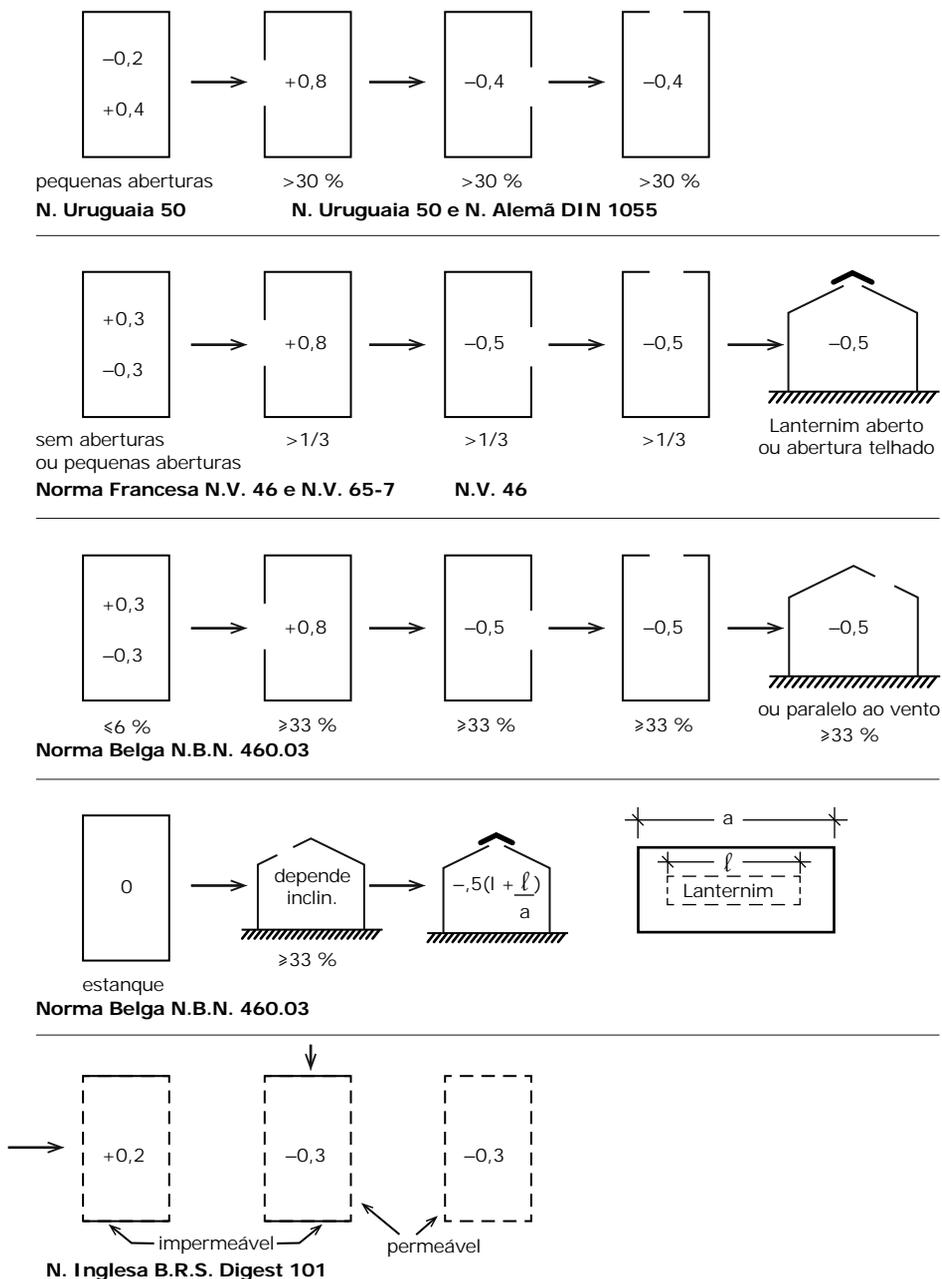


Figura 7.3 – Pressão interna. Valores de normas.

APÊNDICE A

EXEMPLOS DE CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA

a) Alguns dos exemplos que elaboramos para cálculo da pressão interna foram incorporados à NBR 6123 e serão transcritos a seguir, incluindo mais informações e comparando-os com as outras expressões dadas no capítulo 2 para cálculo da pressão interna.

b) 1º exemplo

Determinação de c_{pi} em um andar intermediário de um edifício de dimensões $a \times b \times h = 40 \times 15 \times 60$ m. As permeabilidades e coeficientes médios externos (C_e , Tabela 4 da NBR 6123) estão dados na Figura A1. Cálculos feitos com a expressão (2.7), por aproximações sucessivas.

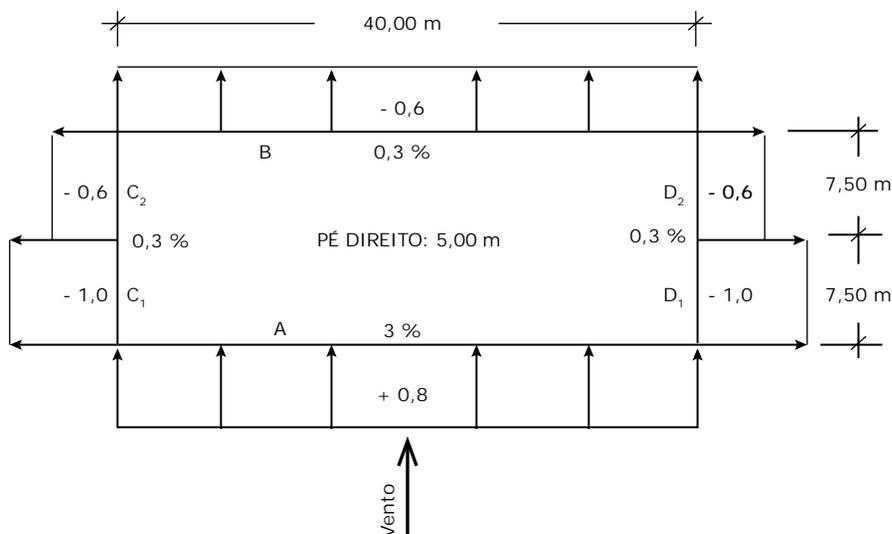


Figura A1 – Pressão interna em andar tipo de edifício.

Local	Área abert. (m ²)	C _e	C _i					
			+0,4		+0,7		+0,75	
			C _e -C _i	±A√...	C _e -C _i	±A√...	C _e -C _i	±A√...
A	6,00	+0,8	+0,4	+3,79	+0,1	+1,90	+0,05	+1,34
B	0,60	-0,6	-1,0	-0,60	-1,3	-0,68	-1,35	-0,70
C ₁ e D ₁	0,23	-1,0	-1,4	-0,27	-1,7	-0,30	-1,75	-0,70
C ₂ e D ₂	0,23	-0,6	-1,0	-0,23	-1,3	-0,26	-1,35	-0,27
Σ=			-	+2,69	-	+0,66	-	+0,07

Pelo sinal do último somatório e considerando uma casa decimal, c_{pi} = + 0,8.

c) 2º exemplo

Determinação de c_{pi} em um pavilhão industrial, com as características geométricas e aerodinâmicas indicadas na Figura A2. A cobertura é considerada impermeável.

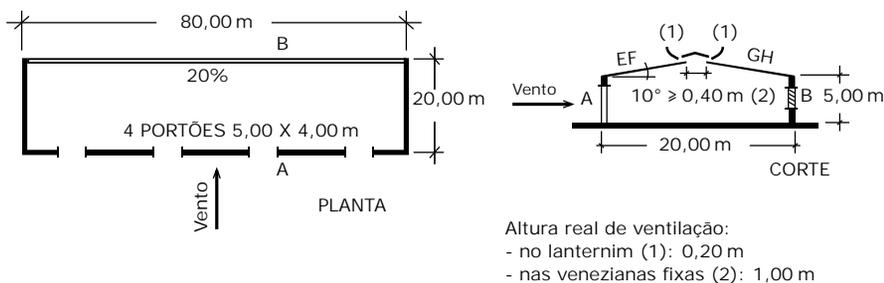


Figura A2 – Pressão interna em pavilhão industrial.

Local	Área abert. (m ²)	C _e	C _i					
			0		- 0,2		- 0,15	
			C _e -C _i	±AV...	C _e -C _i	±AV...	C _e -C _i	±AV...
A	80	+0,7	+0,7	+66,9	+0,9	+75,9	+0,85	+73,8
B	80	-0,5	-0,5	-56,6	-0,3	-43,8	-0,35	-47,3
EF	16	-1,2	-1,2	-17,5	-1,0	-16,0	-1,05	-16,4
GH	16	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-7,2	-0,25	-8,0
Σ=			-	-17,3	-	+8,9	-	+2,1

Pelo sinal do último somatório e considerando uma casa decimal, c_{pi} = - 0,1.

d) 3º exemplo

O mesmo pavilhão do 2º exemplo, porém com apenas um portão a barlavento.

Local	Área abert. (m ²)	C _e	C _i							
			- 0,4		- 0,6		- 0,5		-0,45	
			C _e -C _i	±AV...						
A	80	+0,7	+1,1	+21,0	+1,3	+22,8	+1,2	+21,9	+1,15	+21,4
B	80	-0,5	-0,1	-25,3	+0,1	+25,3	0	0	-0,05	-17,9
EF	16	-1,2	-0,8	-14,3	-0,6	-12,4	-0,7	-13,4	-0,75	-13,9
GH	16	-0,4	0	0	+0,2	+7,2	+0,1	+5,1	+0,05	+3,6
Σ=			-	-18,6	-	+42,9	-	+13,6	-	-6,8

Pelo sinal do último somatório e considerando uma casa decimal, c_{pi} = - 0,5.

e) 4º exemplo

O mesmo pavilhão do 2º exemplo, porém a fachada com venezianas fixas está situada a barlavento. Para obter o maior valor da pressão interna os portões são, agora, considerados fechados.

Local	Área abert. (m ²)	C _e	C _i			
			+0,4		+0,5	
			C _e -C _i	±A√...	C _e -C _i	±A√...
A	80	+0,7	+0,3	+43,8	+0,2	+35,8
EF	16	-1,2	-1,6	-20,2	-1,7	-20,9
GH	16	-0,4	-0,8	-14,3	-0,9	-15,2
Σ=			-	+9,3	-	-0,3

Pelo sinal do último somatório e considerando uma casa decimal, c_{pi} = + 0,5.

f) Comentários aos exemplos dados

- Maior precisão será obtida se for possível determinar o valor médio do coeficiente de pressão no contorno de cada abertura (portões, portas, janelas, venezianas fixas, lanternins, telhas especiais de ventilação, etc.).
- O 4º exemplo mostra o efeito benéfico do lanternim (aberto), que faz diminuir em 0,2 o coeficiente de pressão interna, o qual seria, sem lanternim, igual ao valor do coeficiente de forma externo na região da abertura: +0,7. O valor indicado em 6.2.5 é um pouco maior (+0,8), pois a abertura dominante aí prevista pode estar em região de pressão superior à média (+0,7).
- Ensaios têm mostrado que tanto em pavilhões de planta retangular como em cúpulas a existência de um lanternim aberto causa uma diminuição do coeficiente de sustentação, a qual se situa entre 0,2 e 0,3.
- Os exemplos 1º, 3º e 4º do Anexo da Norma, antes transcritos, correspondem a casos previstos no texto principal, para os quais:

- 1º exemplo – $c_{pi} = +0,8$;
- 3º exemplo – $c_{pi} = -0,5$;
- 4º exemplo – $c_{pi} = +0,55$ (por interpolação).

Dois dos resultados coincidem; a diferença no 3º é de 0,05.

g) Para a aplicação da expressão (2.7) é necessário conhecer a distribuição da pressão externa na região de cada abertura. Em superfícies situadas na esteira da edificação (paredes laterais e de sotavento, coberturas pouco inclinadas) a sucção é praticamente uniforme verticalmente e pode ser considerado como coeficiente médio o próprio coeficiente de forma na região da abertura. Porém, nas regiões em sobrepressão (paredes de barlavento) há uma variação que pode ser considerável, principalmente se as aberturas estiverem concentradas próximo ao terreno ou à cobertura, em fachadas sem beirais.

Exemplifiquemos com o caso de um pavilhão industrial, dimensões $a \times b \times h = 80,00 \times 30,00 \times 7,00$ m, com as aberturas permanentes (ventilação nas paredes e lanternim na cumeeira) e não permanentes (portões) especificadas na Figura A3.

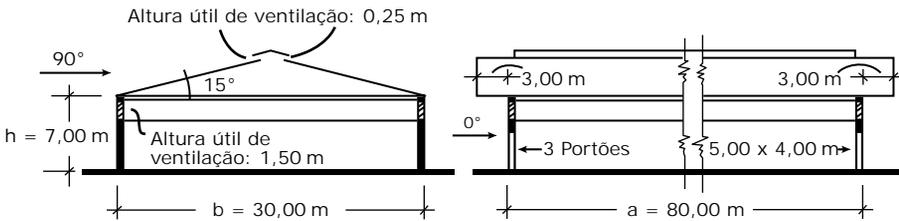


Figura A3 – Características de um pavilhão industrial.

Há beirais de 3,00 m nas fachadas menores. Um beiral a barlavento, evitando o escoamento de ar na parte superior da parede e causando uma zona de escoamento obstruído, faz com que a pressão se distribua quase uniformemente nesta parede. Assim, para vento a 0° o coeficiente a considerar, tanto nos portões como

na ventilação (Figura A4 b) é $C_e = +0,7$, de acordo com o novo texto da NBR 6123.

Para vento incidindo em uma fachada sem beiral, na região da ventilação permanente (parte superior das paredes) a sobrepressão média conduz a um valor do coeficiente de forma local, C_e^* menor que o correspondente a toda a altura da parede. Um valor razoável é $C_e^* = +0,4$ (Figura A4 a).

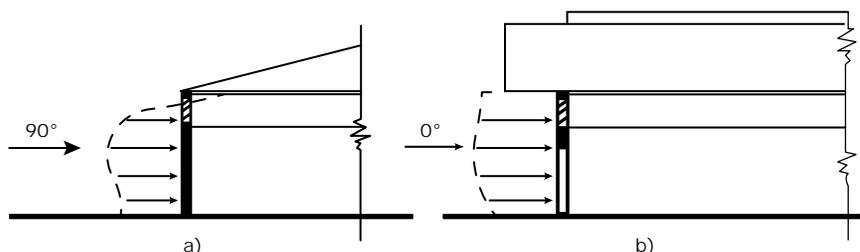


Figura A4 – Influência de um beiral na distribuição das pressões.

No que diz respeito ao telhado, há interesse em considerar os seguintes casos limites de ações:

- A maior sustentação (força ascensional), a qual tende a arrancar telhas, elementos estruturais do telhado ou mesmo todo o telhado, se os efeitos da força de sustentação forem superiores aos efeitos das forças de gravidade. Há também a possibilidade de inversão de esforços em tirantes e barras de treliças, podendo haver flambagem dos mesmos.
- A menor sustentação. Esta só interessará, na prática, se conduzir a um aumento dos esforços causados pelas forças de gravidade. Isto é, se resultar uma força de sustentação negativa (dirigida para baixo).

No 1º caso é preciso determinar a máxima pressão interna. As aberturas não permanentes (portões, neste exemplo) serão consideradas abertas ou fechadas, na combinação que conduzir a máxima pressão interna:

- abertos os portões situados em paredes submetidas a sobrepressões;
- fechados os portões situados em paredes submetidas a sucções.

No 2º caso deve ser determinada a pressão interna mínima. Inverte-se agora a situação das aberturas não permanentes:

- fechados os portões situados em paredes submetidas a sobrepressões;
- abertos os portões situados em paredes submetidas a sucções.

Se houver uma probabilidade razoável de ruptura (aberturas acidentais) ou de ordem errônea de fechamento durante a construção (aberturas construtivas), oitões ou outras partes fechadas com vidros fixos deverão ser considerados com o mesmo critério adotado para os portões. Evidentemente, a probabilidade de acidente por ordem errônea de fechamento é bem menor que a correspondente à ruptura dos vidros, pois a probabilidade de um vento violento é menor durante a construção do que durante toda a vida útil da edificação. Entretanto, foi o que aconteceu com o pavilhão de exposições da Fenac, Novo Hamburgo, RS: o vento, incidindo perpendicularmente a uma fachada ainda sem vidros no oitão e sem os portões colocados nas respectivas aberturas, causou uma sobrepressão interna, a qual, junto com a sucção externa (de alto valor, na zona de barlavento da cobertura), levou ao arancamento e destruição do telhado.⁷

Voltemos ao nosso pavilhão. A distribuição das pressões externas, em termos de coeficientes de forma, C_e , de acordo com a NBR 6123,⁶ está indicada na Figura A5.

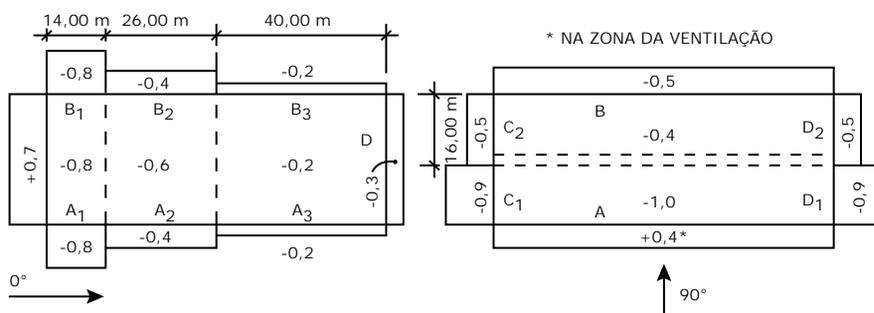


Figura A5 – Coeficientes de forma externos, C_e .

O cálculo de C_i , por aproximações sucessivas, levou aos seguintes valores:

Sustentação máxima: vento a 0° : $C_i = -0,2$

vento a 90° : $C_i = -0,4$

Sustentação mínima: vento a 0° : $C_i = -0,3$

vento a 90° : $C_i = -0,45$

com arredondamento de 0,05.

A diferença entre a sustentação máxima e mínima, para cada uma das duas incidências do vento, é pequena (0,1 para vento a 0° 0,05 para vento a 90°), o que mostra que a grande área de ventilação permanente torna pequena a influência dos portões.

Com os portões a barlavento totalmente abertos (situação que conduz à maior sustentação) ainda aparece uma sucção no interior do pavilhão ($C_i = -0,2$), causando uma diminuição da força de sustentação originada pela sucções externas.

Este exemplo mostra o efeito altamente benéfico de uma boa ventilação permanente. Sem esta ventilação, considerando os portões de barlavento abertos e os de sotavento fechados, com vento a 0° , chega-se a $C_i = +0,7$.

Nestas condições, a pressão interna aumenta o módulo do coeficiente de forma, $C = C_e - C_i$, de 0,9. Os valores do coeficiente de forma, nas três regiões da cobertura indicadas na Figura 9, são os seguintes:

	A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	A ₃ e B ₃
Com ventilação permanente (C _i = -0,2):	-0,6	-0,4	0
Sem ventilação permanente (C _i = +0,7):	-1,5	-1,3	-0,9

A inexistência de uma adequada ventilação permanente pode, portanto, ser a causa do colapso de muitos pavilhões industriais submetidos a ação do vento.

Devido à grande influência das aberturas permanentes, acima constatada, estudemos ventilações intermediárias, para vento a 0°:

- Portões a barlavento, abertos, e lanternim. Não há ventilação nas paredes:

	A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	A ₃ e B ₃
C _i = +0,4;	C = -1,2	-1,0	-0,6

- Portões a barlavento, abertos, e ventilação nas paredes. Não há lanternim:

	A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	A ₃ e B ₃
C _i = -0,2;	C = -0,6	-0,4	0

Os coeficientes de forma para os quatro casos são apresentados na Figura A6. Conclui-se que (portões a barlavento sempre abertos):

- um lanternim com as características do exemplo diminui o coeficiente de pressão interna (e o módulo do coeficiente de forma) de 0,3.
- uma ventilação nas paredes com as características do exemplo diminui o coeficiente de pressão interna (e o módulo do coeficiente de forma) de 0,9.
- com esta ventilação nas paredes a influência do lanternim é desprezável.

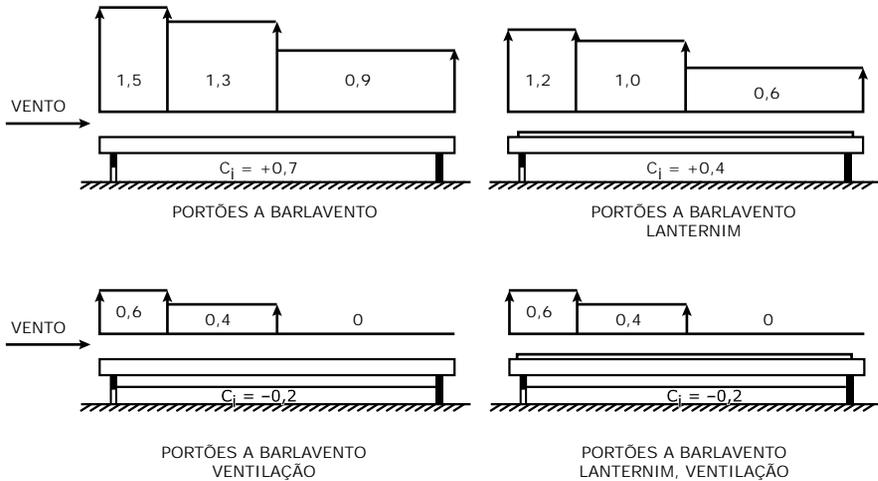


Figura A6 – Coeficientes de forma na cobertura de um pavilhão industrial.

h) Para os quatro exemplos apresentados na NBR 6123 – com c_{pi} calculado pela expressão (2.7) e apresentados nos exemplos 1º a 4º acima – calculamos c_{pi} também pelas expressões (2.14) e (2.16). Resumidamente, essas três expressões podem ser substituídas por

$$\sum_1^n [\pm A_j (|C_{e,j}^* - C_i^*|^n)] = 0 \quad (A1)$$

Os valores de c_{pi} , com aproximação de meio décimo, aparecem na Tabela A1.

Comparando com os resultados obtidos com a aplicação do valor de n recomendado como média de medidas feitas em construções ($n = 0,65$), vemos que o critério da norma brasileira leva a valores, em módulo, iguais ou superiores. O critério de Davenport ($n = 1$) conduz a valores, em módulo, inferiores. A diferença só é importante, nos exemplos acima, quando a abertura de barlavento é nitidamente dominante (Exemplos 1º e 4º).

Tabela A1 – Coeficiente de pressão interna pela (A1), com diversos valores do expoente n

Exemplo da NBR 6123	Valores de C_i para n=		
	0,5	0,65	1
1ª	+0,75	+0,7	+0,6
2ª	-0,15	-0,1	-0,05
3ª	-0,45	-0,45	-0,4
4ª	+0,5	+0,4	+0,3

i) Os quatro exemplos da norma brasileira referem-se a edificações da Classe C (“Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros”). Lembremos que, conforme foi visto em 5e, o efeito das rajadas sobre a pressão interna, no caso de abertura dominante a barlavento, faz com que se deva considerar S_2 da Classe A. Se, como é usual, for considerado, para o cálculo da pressão interna, o mesmo S_2 usado no cálculo estrutural da edificação como um todo, a norma brasileira estará, de certo modo, compensando o uso de um S_2 menor pela adoção de um coeficiente de pressão interna maior que o real.

Vejamos esta compensação numericamente, para os casos de abertura a barlavento nitidamente dominante (1ª e 4ª exemplos).

1ª exemplo

Consideremos terreno de Categoria IV e $z = h/2 = 30$ m.

Da Tabela 2 da NBR 6123 tira-se:

$$S_2(A) = 0,98 \quad \text{e} \quad S_2(C) = 0,93$$

A relação de pressões será:

$$[S_2(A) / S_2(C)]^2 = [0,98/0,93]^2 = 1,11$$

E c_{pi} passará de +0,7 para $1,1 \times 0,7 = +0,78$, valor este próximo ao valor calculado pelo critério da Norma, $c_{pi} = +0,75$. (Lembramos que os resultados foram aproximados a meio décimo).

4º exemplo

Terreno de Categoria III, $z = 5,00$ m:

$$S_2(A) = 0,88 \quad \text{e} \quad S_2(C) = 0,82.$$

A relação de pressões será:

$$[S_2(A)/S_2(C)]^2 = [0,88/0,82]^2 = 1,15$$

E c_{pi} passará de $+0,4$ para $1,15 \times 0,4 = +0,46$, valor também próximo ao obtido pela aplicação da Norma ($c_{pi} = +0,5$, aproximado a meio décimo).

Em conclusão, a norma brasileira considera um aumento das pressões internas causado pelas rajadas de vento em construções com abertura nitidamente dominante a barlavento. Aumentos da pressão interna, por abertura súbita de portas, portões ou janelas não são maiores que as causadas por rajadas, conforme foi visto no capítulo 5. Aplicando a norma brasileira, deve ser considerado o parâmetro S_2 correspondente à Classe da construção como um todo (A, B ou C, de acordo com suas dimensões frontais).

REFERÊNCIAS

- 1 – ARNSTEIN, K. e KLEMPERER, W. Wind pressures on the Akron airship dock. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v. 3, n. 3, jan. 1936. p. 88-90.
- 2 – A.S.C.E. TASK COMMITTEE ON WIND FORCES, New York. Wind forces on structures; final report. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, New York, N.Y., 126: 1124-1198, Oct. 1961.
- 3 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. Norma Brasileira NB 5. Rio de Janeiro, 1943. 2 p.
- 4 – _____. *Norma Brasileira NB 5*. Rio de Janeiro, 1961. apud LANGENDONK, T. *Comentários à Norma Brasileira NB-1; itens 1 a 13*. São Paulo, ABNT, 1962. p. 44-47.
- 5 – _____. *Norma Brasileira NB 599; Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1978.
- 6 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, São Paulo, *Norma Brasileira NBR 6123; Forças devidas ao vento em edificações*. São Paulo, 1988.

- 7 – BLESSMANN, J. *Acidentes Causados pelo Vento*. 2. ed. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978. (Série Engenharia Estrutural, 2). Ou a terceira edição de 1986.
- 8 – _____ *Comentários de Alguns Tópicos de Norma de Vento*. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975. (Série Engenharia Estrutural, 6).
- 9 – _____ *Considerações sobre alguns Tópicos para uma Norma de Vento*. 2. ed. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1979. (Série Engenharia Estrutural, 4).
- 10 – _____ Efeitos do vento na cobertura de um ginásio com lanternim. In: JORNADAS SUL AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 22. Santiago, Chile, 1983. *Anais*, 1983, v. 1, A-7. 15 p.
- 11 – _____ Estudo Aerodinâmico da Cúpula do Hotel Tropical de Manaus. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 14; e SIMPÓSIO PAN-AMERICANO DE ESTRUTURAS, 4, Buenos Aires, Out. 1970. *Anais*, Buenos Aires, CEI, 1971.
- 12 – _____ Pressures on domes with several wind profiles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3. Tóquio, Japão, 1971. *Anais*, 1971. p. 317-326.
- 13 – _____ Vento em Cúpulas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 12. e SIMPÓSIO PAN-AMERICANO DE ESTRUTURAS, 3, Caracas, jul. 1967. *Anais*. Caracas, 1967.
- 14 – _____ *Boletim IMME*, Caracas, 5(20): 49-100, Oct. 1967.
- 15 – _____ *Engenharia no Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 3(19): 22-24, 26-28, 30-32, 34-36, Nov./Dez. 1968, Resumo.
- 16 – GERTSENCHTEIN, M. e BLESSMANN, J. Efeitos do Vento em Armazém da Cia. Docas de Santos. *Estrutura*, Rio de Janeiro, (87):49-59, Jun. 1979.
- 17 – BRITISH STANDARD CODE OF PRACTICE. Code of basic data for the design of buildings. Chapter 5. Loading. Part 2. Wind loads. London, British Standards Institution, 1972.
- 18 – BUILDING RESEARCH STATION. Garston. *The assessment of wind loads*. Garston, 1970, 12 p. (Digest, 119).
- 19 – _____ *Wind loading on buildings- 2*. Garston, 1969. (Digest, 101).

- 20 – BUILDING RESEARCH STATION. *Wind loading on buildings*- 3. Garston, 1969. p. 1 -8. (Digest, 105).
- 21 – _____ COMMISSION DES RÈGLES NEIGE ET VENT, Paris. *Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions: Règles N.V. 65, Revision 1976.* Paris, Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, 1976.
- 22 – CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE. *Calcul des effets du vent sur les constructions; recommandations, Construction Métallique, n. 3, sept. 1979.*
- 23 – COOK, N.J. *The designer's guide to wind loading of building structures.* Part 2, Static structures. Londres, Butterworths, 1990.
- 24 – DALGLIESH, W.A. Air infiltration and internal pressures in tall buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TALL BUILDINGS, 3. Chicago, 1987. *Anais*, 1987. p. 15-26.
- 25 – DAVENPORT, A.G. The relationship of reliability to wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v.13, n. 1-3. p. 3-27, 1983.
- 26 – D.HAVÉ. R. *L'Action du vent sur les bâtiments.* Bruxelles. A. B. E. M., 1965. 11 p. (Publication, 321).
- 27 – _____ *Action du vent sur les bâtiments; raport des recherches faites par le Bureau SECO avec l'appui de IRSIA.* Bruxelles. Bureau de Contrôle pour la Sécurité de la Construction en Belgique, 1963. 2v.
- 28 – FLACHSBARTH, O. *Winddruck auf Gasbehälter.* Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. IV Lieferung, 1932. p. 134-138.
- 29 – FRANÇA. Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme. Paris. *Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions: Règles N.V. 1946.* Paris, 1947. 85 p.
- 30 – HADDON, J. D. Wind loading on roofs. *Engineering*, London, 184 (4782): 559-561, Nov. 1957.
- 31 – HEMPEL, G. *Lastannahmen im Hochbau.* Bruder. 1948. 2v.
- 32 – HOLMES, J.D. Mean and fluctuating internal pressures induced by wind. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 5. Fort Collins, Colorado. 1979. *Anais*, 1979. IV-8 (“Pré-impressão”).

- 33 – INSTITUT BELGE DE NORMALISATION, Bruxelles. *Action du vent sur les constructions*; Bâtiments-NBN 460.03. Bruxelles, 1960. 16 p.
- 34 – INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. Montevideo. Norma Uruguay U.N.I.T., norma 50; Norma para la acción del viento sobre construcciones. Montevideo, 1948. 11 p.
- 35 – IRMINGER, J. O. V. e NØKKENTVED, C. *Wind-pressure on buildings*. Experimental Researches, First Series. Copenhagen, 1930.
- 36 – _____ *Wind-pressure on buildings*. Experimental Researches, Second Series. Copenhagen. Naturvidenskabelige Samfund, 1936.
- 37 – LIU, H. e FARTASH, M. Field measurements of building internal pressure. In: U.S. NATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING. 5. Lubbock, Texas, 1985. p.4 B. 51-8.
- 38 – LIU, H. e SAATHOFF, P.J. Building internal pressure: sudden change. Proceedings A.S.C.E., *Journal of Structural Division*, Nova York, v. 107, n. EM2, p. 309-321, April, 1981.
- 39 – _____ Internal pressure and building safety. Proceedings A.S.C.E. *Journal of Structural Division*, Nova York, v. 108, n. ST10. p. 2223-2234. Oct. 1982.
- 40 – MACHADO, C. G. *Influência de diversos fatores sobre as pressões causadas pelo vento em telhados a duas águas*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre, 1984. [Dissertação de Mestrado]
- 41 – MACHADO, C.G. e BLESSMANN, J. Pressões causadas por vento turbulento em telhados a duas águas de proporções em planta 4 x 1, com e sem lanternim fechado. *Caderno Técnico CT-80*, Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Maio 1985.
- 42 – NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. Associate Committee, Ottawa. *Handbook of pressure coefficients wind loads*: NRC 6485. Ottawa, 1961. 18 p. Supplement, 3.
- 43 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. *Supplement n.4 to the national building code of Canada. Commentary n.1*. 1970.

- 44 – NEWBERRY, C.W. The measurement of wind pressures on tall buildings. In: WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES: Symposium,16., Teddington, 26-8 June, 1963. *Proceedings*. Teddington, National Physical Laboratory, 1963. v. 1, p.113-149, Paper 13.
- 45 – NEWBERRY, C.W. e EATON, K.J. *Wind loading handbook*. Londres, Building Research Establishment Report, 1974.
- 46 – PRIS, M. R. *L'Action du vent sur les bâtiments et constructions*. Partie I.
- 47 – SEIFERTH. *Winddruckmessungen an einem Gasbehälter*. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. III Lieferung, 1935. p. 144-146.
- 48 – SEXTON, D. E. *Building aerodynamics*. Garston, Building Research Station, 1968. 6p. (Current Paper 64/68)
- 49 – SILVEIRA, N.I.B. *Pressões causadas por vento turbulento em telhados a duas águas com e sem lanternim*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1983. [Dissertação de Mestrado]
- 50 – SILVEIRA, N.I.B. e BLESSMANN, J. *Pressões causadas por vento turbulento em telhados a duas águas com e sem lanternim fechado*. *Caderno Técnico CT.A-63*, Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Jan. 1984.
- 51 – SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES, Zurich. *Normes techniques n.160: Normes pour les charges, la mise en service et la surveillance des constructions*. Zürich, 1970. 40p.
- 52 – STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. *Rules for minimum design loads on structures. Part 2. Wind Forces*. AS 1170, Part 2, 1975.
- 53 – STATHOPOULOS, T. e KOZUTSKY, R. Wind induced internal pressures in buildings. *Journal of Structural Engineering – A. S. C. E.*, Nova York, v. 112, n. 9, p. 2012 -2026, Sept. 1986.
- 54 – STATHOPOULOS, T. e LUCHIAN, H.D. Transient wind-induced internal pressures. *Journal of Engineering Mechanics -A. S. C. E.*, Nova York, v. 115, n. 7, p. 1501-1514, July 1989.

- 55 – SURRY, D., DAVENPORT. A.G. e STATHOPOULOS, T. The revised wind loads for low-rise buildings. In: CANADIAN WORKSHOP ON WIND ENGINEERING, 3. Vancouver e Toronto. Canadá. *Anais*, 1981. “Paper” II.1, 22p.
- 56 – THOMPSON, R.A. Protection of small buildings against high velocity winds. *Florida Engineering and Industrial Experiment Station; Bulletin*, Florida, 3(7):1-49, Sept. 1949.
- 57 – VICKERY. B.J., DAVENPORT. A.G. e SURRY. D. Internal pressures in low-rise buildings. In: CANADIAN WORKSHOP ON WIND ENGINEERING, 4. Toronto, Canadá. *Anais*, 1984. p.43-64.
- 58 – WHITBREAD. R.E. e PACKER. M.A. *Wind-tunnel tests to determine the effectiveness of a ridge ventilator for alleviating the wind loading on a light-weight roof*. Teddington, National Physical Laboratory. Aerodynamics Division. 1963. (NPL Aero Report. 1077)
- 59 – WILSON, J.A. Windstorms and their affect on buildings. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Boston, 38(1): 262-71, Jan. 1961.
- 60 – WINDLAST-DIN 1055. *Beton-Kalender*, Berlin, p. 516-523, 1956.

Tipologia utilizada no texto:
Chaparral Pro, 12,5/15,8
Impresso papel: Offset 75g
Impresso na Gráfica e Editora Copiart - Tubarão/SC

Editora da UFRGS • Ramiro Barcelos, 2500 – Porto Alegre, RS – 90035-003 – Fone/fax (51) 3308-5645 – editora@ufrgs.br
– www.editora.ufrgs.br • *Direção*: Sara Viola Rodrigues • *Editoração*: Luciane Delani (coordenadora), Alice Hetzel, Carla M. Luzzatto, Cristiano Tarouco, Fernanda Kautzmann, Maria da Glória Almeida dos Santos e Rosangela de Mello;
suporte editorial: Alexandre Giaparelli Colombo, Jaqueline Moura e Jeferson Mello Rocha (bolsistas) • *Administração*:
Aline Vasconcelos da Silveira, Getúlio Ferreira de Almeida, Janer Bittencourt, Jaqueline Trombin, Laerte Balbinot Dias,
Najára Machado e Valéria da Silva Gomes.

Os esforços exercidos pelo vento sobre uma edificação dependem tanto das pressões externas como das internas. Estas variam com a posição, tipo e dimensões das aberturas externas. A determinação tão exata quanto possível das pressões internas é particularmente importante em edificações com grandes espaços internos e telhados leves. Uma distribuição adequada das aberturas nas paredes e/ou telhados permite diminuir a força ascensional exercida sobre os telhados por ventos fortes.

