

PRESSÃO INTERNA

RESERVA TÉCNICA
Editora da UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Earle Diniz Macarthy Moreira, Reitor

Mário Rigato, Vice-Reitor

Eloy Julius Garcia, Pró-Reitor de Graduação

**Francisco Luís dos Santos Ferraz, Pró-Reitor de Planejamento e responde
pela Pró-Reitoria de Administração**

Gerhard Jacob, Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

João Carlos Athayde Dias, Pró-Reitor de Assistência à Comunidade Universitária

Ludwig Backup, Pró-Reitor de Extensão

EDITORA DA URG

Blasio H. Hickmann, Diretor

**Titulares — Almiro R. Matos do Couto e Silva, Guilhermino Cesar, Manoel Luiz
Leão, Rubens Mario Garcia Maciel e Tania Maria Carvalho**

**Suplentes — Antônio Alves de Paula Azambuja, Armindo Trevisan, Darcy Dillen-
burg, Francisco Mauro Salzano e Helgio Henrique Casses Trindade**

Presidente — Blasio H. Hickmann

JOAQUIM BLESSMANN

- Engenheiro Civil
- Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aero-náutica do ITA
- Professor Adjunto da Escola de Engenharia da UFRGS
- Pesquisador-Titular do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

PRESSÃO INTERNA

(2ª edição, ampliada)

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL/5



Editora da UFRGS
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre/1981

Direitos desta edição:
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Blessmann, Joaquim

Pressão Interna. 2.ed. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981.

64p. ilust. 23cm (Série Engenharia Estrutural, 5)

I. Título. II. Série.

CDU 624.042

CDD 624.175

ISBN 85-7025-030-4

Nº do registro: 3302

Nº da obra: 967

Data: 26/05/2010

SUMÁRIO

Simbologia/8

1 – Introdução/9

2 – Ensaio: Permeabilidade das Paredes/11

3 – Ensaio: Lanternins/15

4 – Cálculo da Pressão Interna/25

5 – Normas/29

6 – Conclusões e Recomendações/43

Apêndice: Programas/49

Referências Bibliográficas/59

SIMBOLOGIA

- l = comprimento da abertura do lanternim.
- 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
- $a \cdot b$ = dimensões em planta
- q = pressão dinâmica ao longe = $(1/2)\rho \bar{V}^2$
- Q = vazão volumétrica
- A = área de parede; área de orifício; área de referência para cálculo de coeficientes aerodinâmicos
- A_p = área de parede
- \bar{V} = velocidade média de referência do vento
- \bar{V}_{z_0} = velocidade média do vento na altura z_0
- Δp_e = pressão efetiva externa
- Δp_i = pressão efetiva interna
- ρ = massa específica do ar
- μ = percentagem de aberturas em uma superfície

1 – INTRODUÇÃO

a) “Quando o telhado de cobre da Catedral Ribe na Dinamarca foi renovado 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 (cobre, zinco, feltro, etc.).

Uma construção, para ser habitável, não pode ser estanque ao ar. Além da sufocação dos habitantes, a diferença entre a pressão interna e externa em um dia de ventania faria romper alguma parte da construção: janelas, portas, telhado, painéis de revestimento, etc. Se, por exemplo, a pressão atmosférica baixar de 760mm para 740mm de mercúrio, externamente, e a construção for estanque, haverá uma sobrepressão interna de 270kgf/m^2 agindo sobre todas as superfícies limítrofes.

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) a pressão existente tem um valor intermediário entre as sobrepressões e as sucções externas extremas. Ela depende da localização, tipo e quantidade de aberturas, bem como das repartições internas ou outros obstáculos interiores.

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

b – Ibid., p.45.

Estas aberturas podem ser:

- normais. Aberturas normalmente existentes: portas, janelas, gateiras, chaminés, lanternins, paredes vazadas, etc.
- por danos. Por exemplo: um pico de sucção local externa arranca elementos da cobertura do telhado ou do revestimento das paredes; ruptura de vidros por sobrepressão externa ou por objetos lançados pelo vento. A abertura assim formada poderá fazer com que apareça uma sobrepressão interna, provocando em certos casos danos ainda muito maiores.

A consideração tanto quanto possível correta da pressão interna torna-se particularmente importante no caso de grandes recintos, tais como pavilhões para exposições e para indústrias, hangares, estações ferroviárias cobertas, cinemas, igrejas, salões de clubes, pavilhões agrícolas e pecuários, depósitos de cereais, etc.

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 telhado. Pode-se, mediante certos dispositivos (ver 6.c), fazer com que reine no interior da construção uma sucção, conseguindo-se assim evitar um tipo de acidente muito comum em construções leves e de grandes vãos.

Em linhas gerais pode-se dizer que, se uma parede tem muito mais aberturas que as demais, a pressão interna se aproxima do valor médio existente externamente nesta parede, nas bordas das aberturas.

Se, porém, a permeabilidade for disseminada mais ou menos uniformemente em toda a construção (só paredes, ou paredes e telhado), teremos sucção dentro da mesma, pois a maior parte da construção se encontra externamente sujeita a sucções. Isto foi verificado não só em modelos, mas também em medidas em construções reais.

No caso de uma única grande abertura, se ela, por suas dimensões, forma e situação, não alterar sensivelmente o fluxo externo de ar, a pressão interna será aproximadamente a média das pressões externas nas bordas da abertura. Isto vale tanto para aberturas em uma parede (janela, portão, porta) como no telhado (lanternim).

2 – ENSAIOS: PERMEABILIDADE DAS PAREDES

a) Irminger e Nøkkentved,²⁶ 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:

1º — em uma construção permeável ao ar a pressão interna pode ser substancialmente diferente da pressão atmosférica.

2º — 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.

3º — 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 sotav.: c_{pi} sem alteração;

— aumento de 50% a barlav.: c_{pi} passou de $-0,32$ para $-0,26$;

— aumento de 100% a barlav.: c_{pi} passou de $-0,32$ para $-0,20$.

b) Em ensaios feitos na Universidade de Melbourne, Austrália,³⁵ com modelo de pavilhão industrial, a pressão interna máxima foi obtida com apenas 10% de aberturas na parede de barlavento: $c_{pi} = +0,73$.

c) D'Havé^{19,20} realizou pesquisas muito elucidativas para determinar a influência da percentagem de aberturas na pressão interna. Utilizou modelos cúbicos com $a.b.h = 200\text{mm}$; a cobertura era plana ou em telhado a duas águas, inclinação de 30° . Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 1.

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) Newberry³⁰ 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 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,²² cujos resultados aparecem na Fig. 1. Esta figura, tirada do telhado 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 abscissa 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.

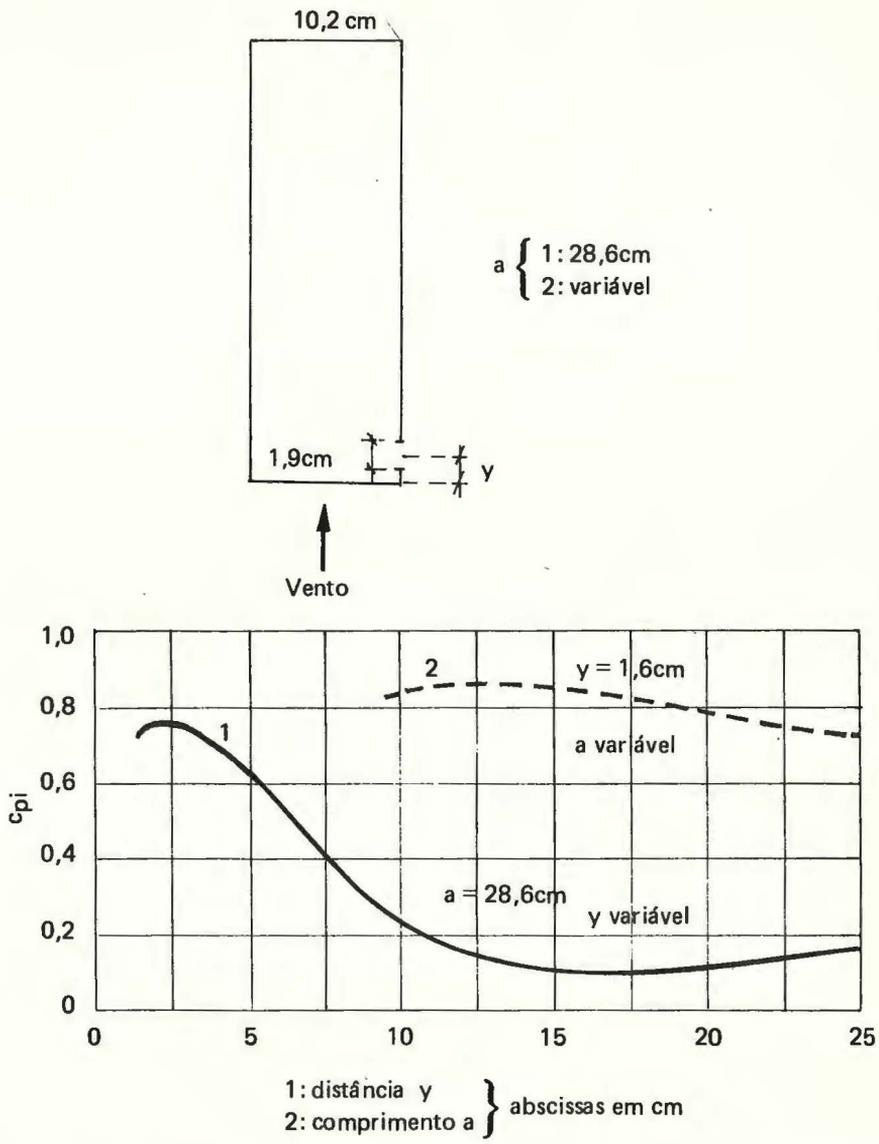


Fig. 1 – Pressão interna, com uma abertura na parede lateral. Ensaios de Haddon

A curva 2 mostra o variar da sucção interna para a porta em uma posição fixa, com seu eixo a 1,6cm 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 .

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,^{9,10,11} obtivemos os valores apresentados na Tabela 2.

TABELA 2
Pressões no interior de uma cúpula

Cúpula		Variação de c_{pi} nos modelos sobre pilares sem paredes	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.

3 – 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:

1º – pequeno aumento do pico de sucção na cobertura;

2º – 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;

3º – 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

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 (Fig. 2.a).

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 (Fig. 2.b). A pressão interna será uma sucção maior que a sucção externa nas suas bordas.

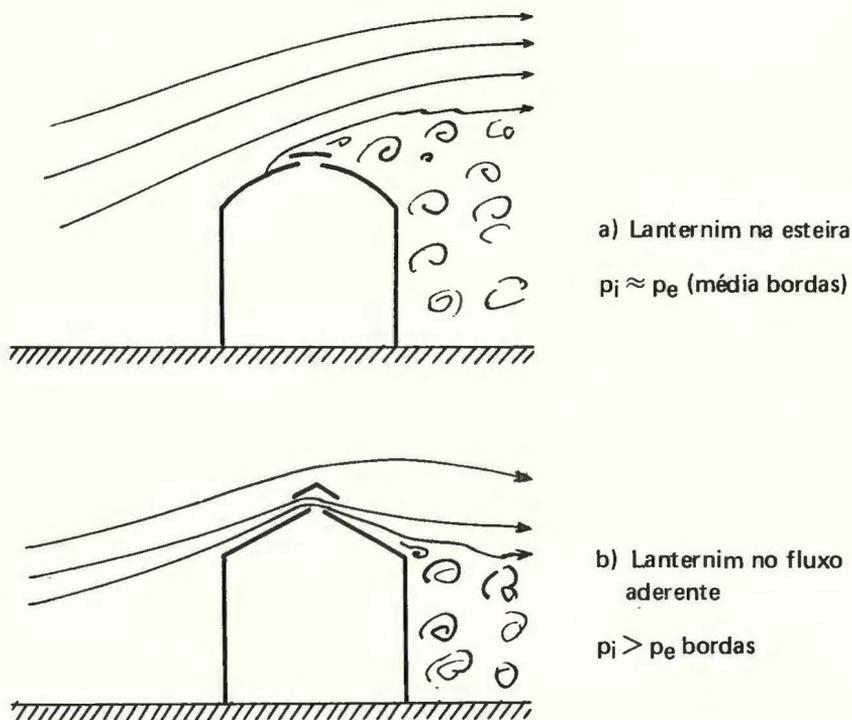


Fig. 2 – Lanternins abertos

b) São clássicos os ensaios de Irminger e Nøkkentved,²⁷ de cuja obra extraímos as Figuras 3 e 4.

No caso da Fig. 3 (e Fig. 2.a) o lanternim não perturba o fluxo externo. A pressão interna é a média das pressões externas nas bordas do lanternim. No caso da Fig. 4 (e Fig. 2.b) aproxima-se da média nas bordas só para vento axial (0°), caso em que o lanternim pouco altera a forma do fluxo externo. Nas outras orientações temos uma sucção bastante superior à média das pressões externas nas bordas.

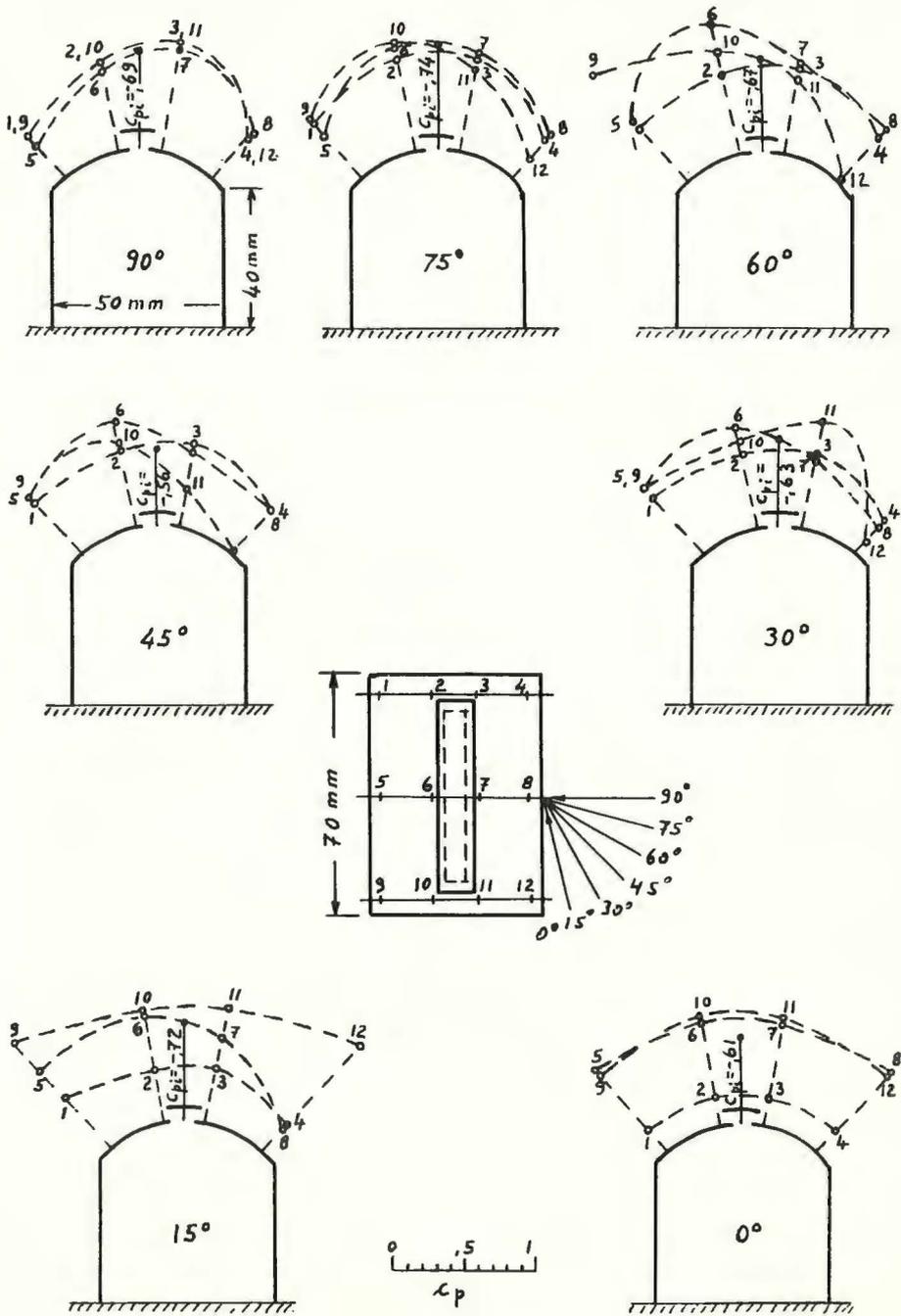


Fig. 3 – Pressão interna e externa em telhado curvo com lanternim.
Ensaio de Irminger e Nøkkentved

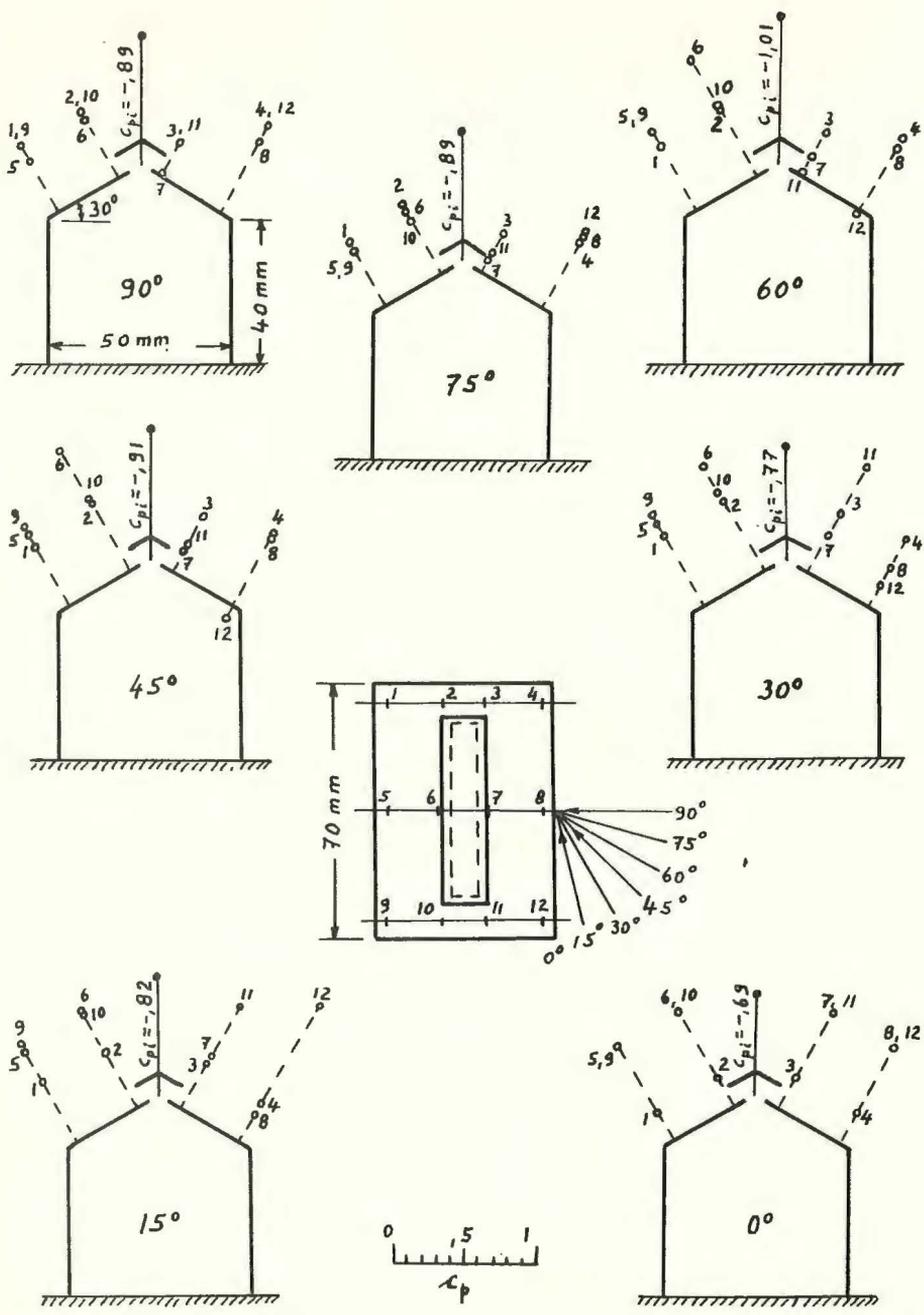


Fig. 4 – Pressão interna e externa em telhado a duas águas com lanternim. Ensaios de Irminger e Nøkkentved

c) Whitbread e Packer³⁷ 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 Fig. 5.

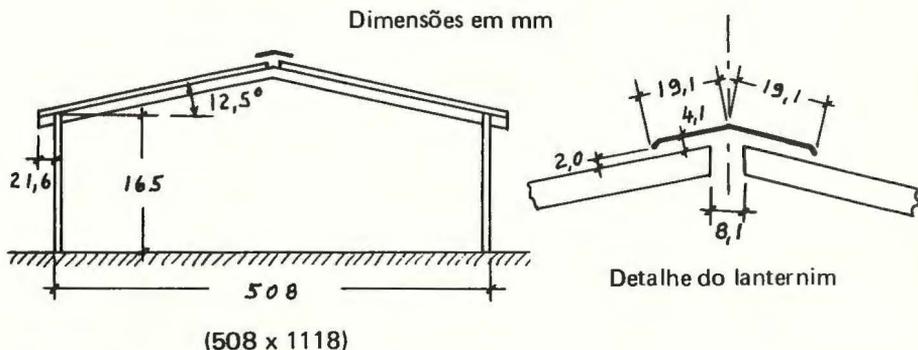


Fig. 5 – Modelo com lanternim

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 $18,3\text{m/s}$ (66km/h); e vento gradiente com velocidade no topo da parede $\bar{V}_{Z0} = 14,6\text{m/s}$ (53km/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.

d) Na Tabela 3 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.

Valores de c_{pi} – Ensaios de Whitbread e Packer

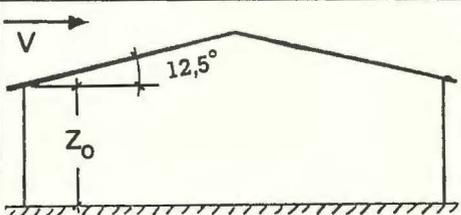
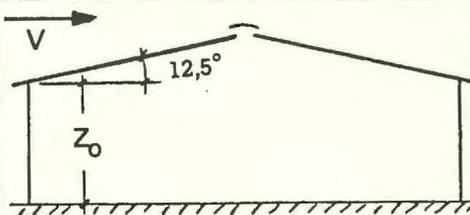
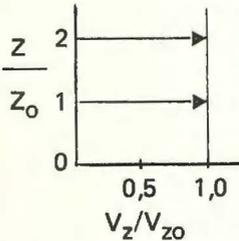
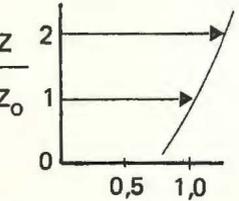
Perfil do vento	% de abertura da parede						
		Só a barlavento	Só a sotavento	Ambas	Só a barlavento	Só a sotavento	Ambas
	0	0	0	0	-0,51	-0,51	-0,51
	0,34	-	-	+ 0,11	-0,39	-0,44	-0,34
	1,11	+ 0,57	-0,18	+ 0,14	-0,18	-0,35	-0,21
	3,33	+ 0,61	-0,18	+ 0,16	+ 0,25	-0,25	-0,07
	14,45	+ 0,67	-0,22	+ 0,25	+ 0,61	-0,27	+ 0,16
	0	0	0	0	-0,55	-0,55	-0,55
	1,11	+ 0,48	-0,22	+ 0,10	-0,21	-0,37	-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

TABELA 3

Esta observação confirma os resultados de D'Havé,^{19,20} que não encontrou alteração sensível nas pressões internas a partir de 5% de aberturas (ver 2.c). 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 2.a), 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.

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: $C_s = 0,78$.

e) 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

c - 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. p.5. (NPL Aero Report, 1077).

d - WHITBREAD, R. E. e PACKER, M. A. *Op.cit.*, p.5.

que com vento uniforme; em geral em torno de 0,1 menor, às vezes 0,2 ou, raramente, 0,3. Na Fig. 6, obtida a partir de gráficos do trabalho que estamos comentando, pode-se ver perfeitamente a influência benéfica do lanternim na sustentação.

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

“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.

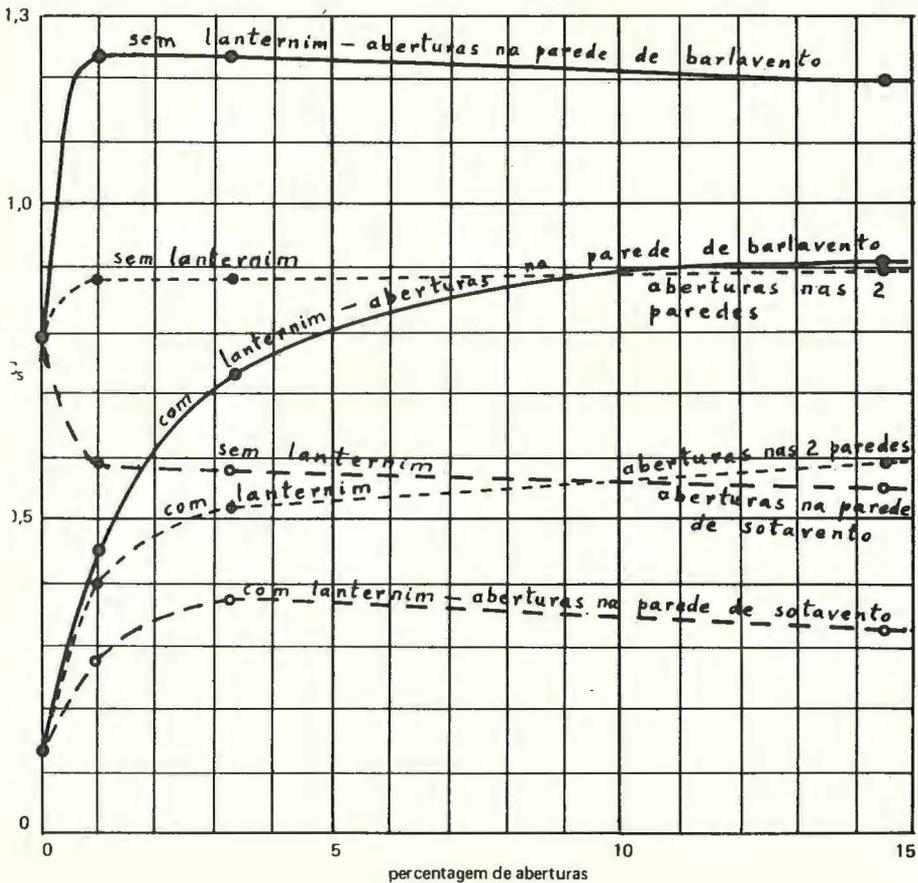


Fig. 6 – Variação de C_s com porcentagem de aberturas em 1 ou 2 paredes.

Vento gradiente.

Ensaio de Whitbread e Packer

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

g) Em ensaios com uma cúpula hemisférica e dotada de um pequeno lanternim (0,32% da área da superfície externa da hemisfera), vento gradiente, obtivemos $c_{pi} = -1,10$.⁸ A velocidade de referência era a do vento sem obstruções na altura do vértice da cúpula, isto é, no lanternim.

^e — WHITBREAD, R. E. e PACKER, M. A. Op.cit., p.6.

4 – CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA

a) Estudos experimentais de Dick – citados por Sexton³² – sobre ventilação natural mostraram que a velocidade da passagem de ar através de pequenas aberturas em construções é aproximadamente proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão entre os dois lados da abertura; em nosso caso, $\Delta p_e - \Delta p_i$.

O estudo teórico, simplificado, conduz a este mesmo resultado. Vejamos.

A quantidade de ar Q (vazão volumétrica) que passa por uma abertura de área A será:

$$Q = K A V \quad (1)$$

K – coeficiente de vazão

$$V - \text{velocidade} = \sqrt{2(\Delta p_e - \Delta p_i)/\rho} \quad (2)$$

Estabelecido o equilíbrio, estamos em regime permanente: o volume de ar que entra será igual ao que sai. Em outras palavras, o volume de ar no interior é constante:

$$\Sigma Q = 0$$

Cf. (1) e (2):

$$\Sigma K A \sqrt{2(\Delta p_e - \Delta p_i)/\rho} = 0$$

ou

$$\Sigma K A \sqrt{\Delta p_e - \Delta p_i} = 0 \quad (3)$$

uma vez que a densidade ρ é praticamente constante.

Se quisermos um cálculo bastante preciso, calculamos Δp , por aproximações sucessivas, devendo também ser determinado o K de cada abertura. Entretanto, supondo K constante, a (3) fica:

$$\Sigma A \sqrt{\Delta p_e - \Delta p_i} = 0 \quad (4)$$

o que está de acordo com os ensaios de Dick.

Conhecida a distribuição de Δp_e e das aberturas na superfície externa, e conhecidas as áreas A destas aberturas, pode-se então calcular Δp_i pela (4). Pode-se trabalhar diretamente com c_{pe} e c_{pi} :

$$\Sigma A \sqrt{c_{pe} - c_{pi}} = 0 \quad (5)$$

b) Irminger e Nøkkentved²⁶ tanto calcularam como mediram os valores de c_{pi} em diversos modelos, aberturas uniformemente distribuídas. Alguns dos valores são dados na Tabela 4.

TABELA 4
 c_{pi} calculados e medidos — Irminger e Nøkkentved

Descrição (vento normal à fachada maior)	c_{pi}	
	calculado	medido
modelo 50·50·100mm; telhado a 20°	− 0,33	− 0,33
idem, telhado a 45°	− 0,34	− 0,38
idem, telhado a 60°	− 0,36	− 0,36
modelo 50·40·70mm; telhado curvo	− 0,28	− 0,29
pavilhão industrial	− 0,26	− 0,26
idem, telhado shed, 3 partes	− 0,22	− 0,22

É de notar a boa concordância entre a maioria dos valores calculados e medidos.

c) Pris³¹ calculou a pressão interna em um cubo para diversas situações de aberturas. Para simplificar o cálculo considerou as aberturas como sendo uniformemente distribuídas em cada uma das paredes e sempre com a mesma percentagem de aberturas em todas elas. Pode-se então substituir a soma das áreas das aberturas em cada parede pela área da parede A_p :

$$\Sigma A_p \sqrt{c_{pe} - c_{pi}} = 0 \quad (6)$$

Obteve Pris os seguintes resultados, vento incidindo normalmente a uma face do cubo:

- abertura na parede de barlavento $c_{pi} = + 0,76$;
- abertura na parede de sotavento $c_{pi} = - 0,28$;
- aberturas nas duas paredes laterais $c_{pi} = - 0,65$;
- aberturas na parede de barlavento e na de sotavento $c_{pi} = + 0,24$;
- aberturas nas quatro paredes $c_{pi} = - 0,35$.

A experiência mostra que este cálculo é válido não só para pequenas aberturas uniformemente distribuídas, mas também para aberturas de maiores dimensões.

d) A publicação Digest 105, do Building Research Station,¹⁶ apresenta o cálculo da área aberta de uma janela no lado de barlavento para que a pressão interna seja governada por esta abertura, estando as outras janelas fechadas.

São dados os seguintes elementos:

- dimensão em planta: 30·50m;
- altura do pavimento: 3m;
- permeabilidade uniforme de 0,1% com todas as janelas fechadas;
- vento normal à fachada maior.
- valores do coeficiente de forma externo:
 - fachada de barlavento $C_e = + 0,7$;
 - fachada de sotavento $C_e = - 0,6$;
 - paredes laterais $C_e = - 0,7$.

É admitido que a abertura da janela é dominante quando fizer aparecer no interior um coeficiente de pressão (ou de forma) igual a 75% do coeficiente de forma externo. Admitiu-se também na parede com a janela aberta uma pressão uniformemente distribuída, com $C_e = + 0,7$.

Portanto:

$$c_{pi} = C_i = 0,75 \cdot 0,7 = + 0,525.$$

Nas fachadas maiores a permeabilidade de 0,1% corresponde a

$$3 \cdot 30 \cdot 0,001 = 0,09\text{m}^2 \text{ de aberturas.}$$

E nas menores (paredes laterais):

$$3 \cdot 15 \cdot 0,001 = 0,045\text{m}^2 \text{ de aberturas.}$$

Substituindo em (5):

$$(X + 0,09) \sqrt{0,7 - 0,525} - 0,09 \sqrt{0,525 - (-0,6)} - (2 \cdot 0,045) \sqrt{0,525 - (-0,7)} = 0,$$

onde X é a área da janela aberta.

São positivos os termos do somatório em que há uma entrada de ar e negativos aqueles em que há saída, em relação aos respectivos Δp_e e Δp_i (ou c_{pe} e c_{pi}). Resolvendo a equação acima:

$$X = 0,376\text{m}^2.$$

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

e) Chamamos de pequenas aberturas aquelas que conduzem a uma pressão interna pequena, situada entre + 0,3 e - 0,3. Não se sabe, para este tipo de aberturas, o valor da pressão interna; apenas os seus limites. O valor depende de como se distribuem estas pequenas aberturas nas faces da construção.

Baseados no que expusemos anteriormente, concluímos que não se pode considerar uma construção, na quase totalidade dos casos, como sendo de pequenas aberturas. Ela deve ser considerada como com grandes aberturas, aparecendo uma pressão interna de 75 a 100% da pressão externa da zona onde está a abertura ou aberturas dominantes. Janelas, portas e mesmo painéis envidraçados fixos podem ser abertos ou rompidos pela pressão do vento ou por objetos lançados pelo vento, fazendo com que a construção se comporte como com grandes aberturas. É comum caso de portões de pavilhões industriais ou de hangares serem arrancados pelo vento, estabelecendo-se no interior uma forte pressão interna.

Construções com *pequenas aberturas* são raras: só construções praticamente sem aberturas, com instalação de ar-condicionado; ou silos, depósitos estanques, etc. Estão, pois, completamente erradas as normas que consideram como com pequenas aberturas (e uma correspondente pequena pressão interna) construções com até um terço ou mesmo 35% de aberturas em uma parede.

f) No Apêndice deste trabalho são apresentados programas para calcular o coeficiente de pressão interna a partir da expressão (6).

5 – NORMAS

a) Vejamos os valores apresentados por algumas normas, antigas e atuais. Iniciemos com a norma brasileira NB-5, 1943.² 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, 1961³

Artigo 10:

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

1º – em superfícies planas, cheias, de construções abertas a barlavento: $C_i = + 0,5$;

2º – em superfícies planas, cheias, de construções abertas a sotavento ou em planos paralelos à direção do vento: $C_i = - 0,5$.

Quando a pressão 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, 1948²⁵

C 4 – A separação em sucção e sobrepressão deve ser feita geralmente em estruturas com telhados curvos e em construções com vãos inferiores superiores a 15m.

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 pres-

são 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 4²³

– 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, 1960²⁴

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, 1970³³

Estão transcritas, em parte, nas normas canadenses²⁸ e norte-americanas.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 proporções $a \cdot b \cdot h = 8 \cdot 4 \cdot 1$, vento incidindo a 45° com as paredes.

Em uma edificação de proporções $a \cdot b \cdot h = 1 \cdot 1 \cdot 2,5$, 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 5). 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, 1946²¹

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 25m.

1º – Construções sem aberturas ou com pequenas aberturas uniformemente repartidas.

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.^{6,7}

TABELA 5
Pressão interna em edifícios de grande comprimento³³

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

2º — 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, 1976¹⁷

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 30m.

— as dimensões devem obrigatoriamente respeitar as seguintes condições:

$$h/b \geq 0,25$$

$$h/a \leq 2,5, \text{ com a condição suplementar}$$

$$b/a \leq 0,4 \text{ se } h/b > 2,5$$

$$f \leq h/2 \text{ para os telhados a duas águas planas}$$

$$f \leq (2/3)h \text{ para os telhados curvos}$$

(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 $C_i = - 0,5$.

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

i) Norma inglesa do Building Research Station, 1969¹⁵

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.”⁹

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.

f — 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. p.115.

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

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).

j) Norma inglesa do Building Research Station, 1970;¹⁴ norma britânica sobre cargas do vento;¹³ norma brasileira NB-599.⁴

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 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 proporção da permeabilidade distribuída total de todas as faces submetidas à sucção (permeabilidade = área das aberturas):

proporção	1	$C_i = + 0,1$
	1 1/2	+ 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 proporção da permeabilidade distribuída em todas as faces sujeitas à sucção:

proporção	1/4 ou menos	.....	$C_i = -0,4$
	1/2	.....	-0,5
	3/4	.....	-0,6
	1	.....	-0,7
	1 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. Esta C_e já é um valor 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 ela 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 4.b 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*⁷).

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

Sugerimos, como regra prática para determinar os valores extremos da pressão interna, quando não for possível determinar com uma exatidão razoável a proporção de permeabilidade do item 5.2.3 da NB-599, e para o caso comum de abertura dominante (esta pode ocorrer por acidente; por exemplo, por ruptura de vidros fixos, a qual pode ser causada tanto pela pressão do vento como por objetos lançados pelo vento ou por pessoas): tomar para coeficiente de pressão interna o mesmo valor do coeficiente de pressão externa indicado na NB-599 para a zona em que se situa a abertura dominante.

Exemplifiquemos a sugestão aplicando-a a uma edificação de proporções

$$1/2 < h/b \leq 3/2 \text{ e } 3/2 < a/b < 4$$

e com telhado com inclinação de 10° .

Os valores de C_i assim determinados estão grupados na Tabela 6.

TABELA 6

Cálculo simplificado dos coeficientes de pressão interna

Descrição	Valor de C_i para vento perpendicular à fachada	
	maior ($\alpha = 90^\circ$)	menor ($\alpha = 0^\circ$)
Abertura dominante a barlavento (Tabela 4.a)	+ 0,7 (Superf. A)	+ 0,7 (Superf. C)
Abertura dominante a sotavento (Tabela 4.a)	- 0,5 (Superf. B)	- 0,2 (Superf. D)
Abertura dominante em parede lateral, na zona EG da Tabela 4.b	- 1,1 (Zona EF)	- 0,8 (Zona EG)
Abertura dominante em parede lateral, na zona FH da Tabela 4.b	- 0,6 (Zona GH)	- 0,6 (Zona FH)

k) A norma australiana²⁹ 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):

“1 – 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 $C_i = - 0,3$.

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

3 – 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 $C_i = + 0,6$;

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).

4 – Uma edificação efetivamente estanque e possuindo janelas que não podem ser abertas $C_i = + 0,3$ 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 cober-

tura, 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) As normas canadenses²⁹ apresentam indicações mais resumidas, aplicáveis a edificações de planta retangular:

1 — Aberturas principalmente na parede de barlavento $C_i = + 0,7$;

2 — Aberturas principalmente na parede de sotavento $C_i = - 0,5$;

3 — Aberturas principalmente nas paredes paralelas à direção do vento $C_i = - 0,7$;

4 — Aberturas uniformemente distribuídas nas quatro paredes $C_i = - 0,3$.

Esta norma não apresenta uma definição quantitativa de abertura dominante.

m) As recomendações da CECM¹⁸ 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 $\mu\%$ 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 agrupados na Fig. 7 e os valores correspondentes de C_i encontram-se na Tabela 7 para diversos ângulos de incidência do vento.

TABELA 7
Coefficientes de pressão interna¹⁸

Caso (ver Fig. 7)	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

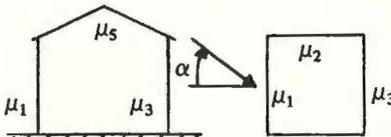
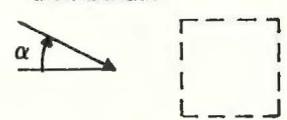
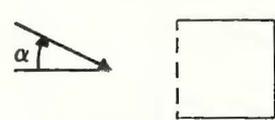
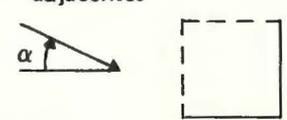
<p>1º Caso: Construções estanques</p>  <p>$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$</p>	<p>2º Caso: aberturas uniformemente distribuídas</p>  <p>$0 < \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 \leq 30\%$</p>
<p>3º Caso: aberturas em uma parede</p>  <p>$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 \geq 3(\mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5) \\ \geq 5\% \end{array} \right\} C_i = C_e$</p>	<p>4º 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>5º 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>

Fig. 7 – Casos de permeabilidade ao ar¹⁸

6 – 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 (2.b), Whitbread e Packer (3.d), é exagerado. Por via analítica chega-se à mesma conclusão (4.d).

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.⁵ 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 55m em planta, telhado curvo, telhas de alumínio (Fig. 8). O vento incidiu quase axialmente. Na parede de barlavento havia uma abertura entre telhas e alvenaria de cerca de 40cm, 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

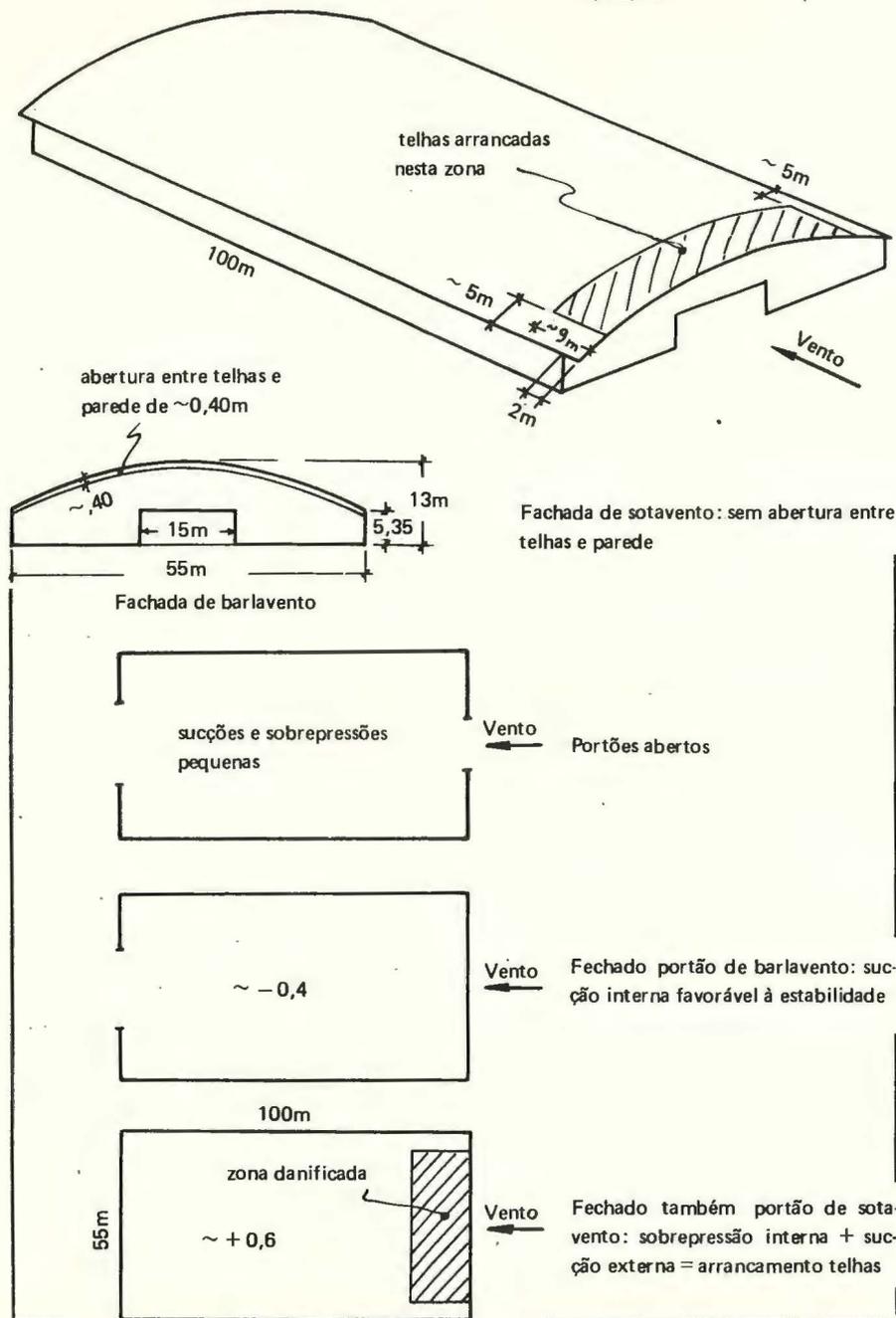


Fig. 8 – Acidente causado pela pressão interna

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 Fig. 8, 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 40cm já citada; se não existisse o beiral, teríamos sucções nesta zona, ou sobrepressões muito pequenas.

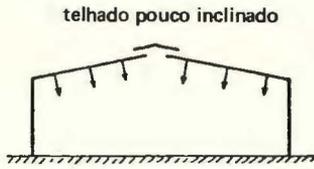
Portanto, quando foram fechados os portões de sotavento, apareceu uma forte sobrepressão interna. Esta, juntamente com o bulbo de sucções externas no telhado (na zona de barlavento), provocou o arrancamento da maioria das telhas em uma faixa de cerca de 9m, exceto os 5m inferiores de cada lado.

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.

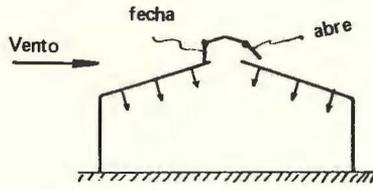
Isto pode ser conseguido de diversos modos, tais como:

— 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 (Fig. 9.a).

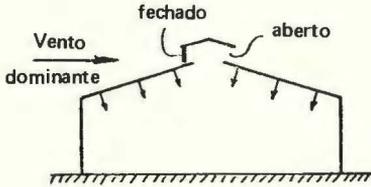
— Para telhados de maior inclinação ou para melhorar os resultados nos pouco inclinados, podemos usar lanternins com tampos tipo válvula (Fig. 9.b). Ou, se os ventos dominantes sopram sempre com a mesma ou aproximadamente a mesma orientação, o lado de barlavento pode estar sempre fechado e o de sotavento sempre aberto (Fig. 9.c). 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.



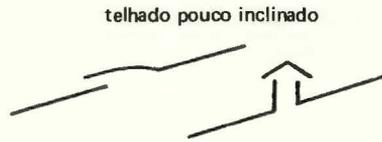
a) lanternim aberto



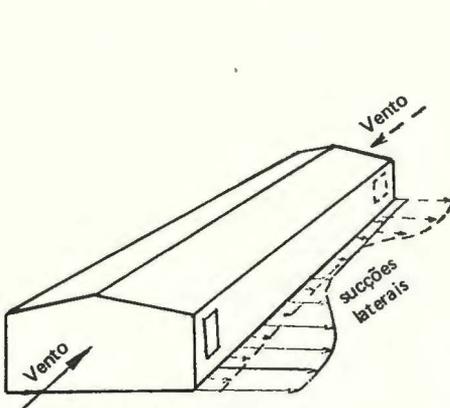
b) janelas válvula



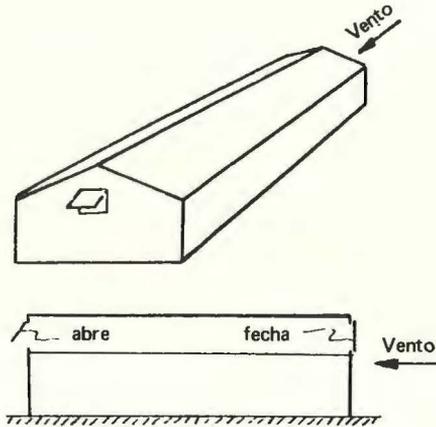
c) lanternim fechado a barlavento



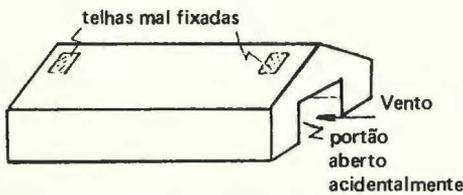
d) telhas especiais com ventilação



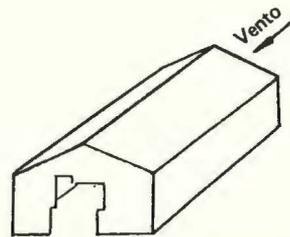
e) janelas nas paredes laterais, próximos aos extremos



f) janelas válvula nos oitões



g) telhas mal fixadas



h) abertura de emergência a sotavento

Fig. 9 – Dispositivos para redução da sustentação

— Uso de telhas especiais com ventilação (tipo concha ou chaminé) em telhados de pequena inclinação, de modo que a sucção externa se transmita ao interior pela ventilação (Fig. 9.d).

— Janelas nas paredes laterais, próximo aos extremos (Fig. 9.e). Haddon,²² por exemplo, em um modelo de proporções $a \cdot b \cdot h = 11,25 \cdot 4 \cdot 2$, 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 82kgf/m^2 ($V = 130 \text{km/h}$) isto corresponde a uma força de 131kgf/m^2 .

— Janelas basculantes, tipo válvula, que abram para fora, colocadas nos oitões (Fig. 9.f). A janela de oitão em sobrepressão (de barlavento) fechará e a do oitão em sucção (de sotavento) abrirá. A solução anterior, da Fig. 9.e, 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 (Fig. 9.h). Thompson³⁴ 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 (Fig. 9.g). 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 Figs. 9.a até 9.d são efetivas para vento aproximadamente normal à cumeeira. As soluções seguintes, bem como as 9.a e 9.d, são eficazes com vento axial ou oblíquo. Aberturas a sotavento, 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 Fig. 10 resume alguns valores de normas para c_{pi} .

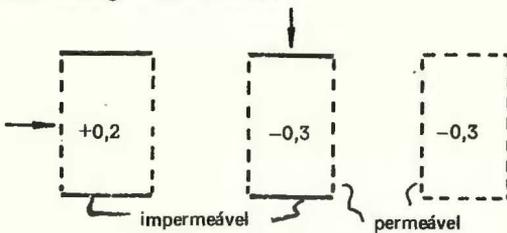
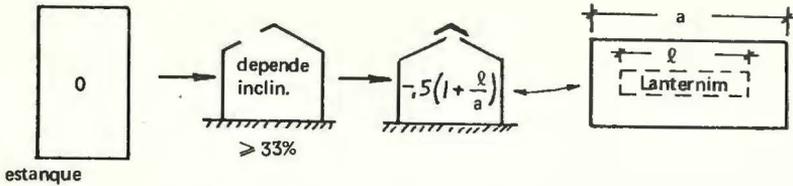
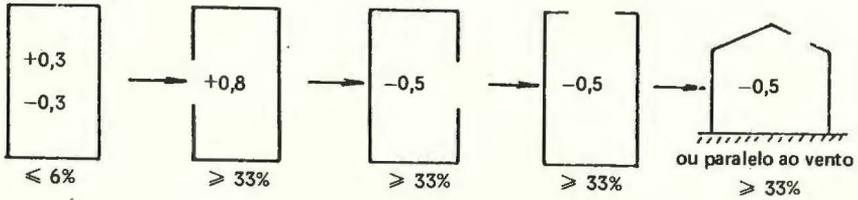
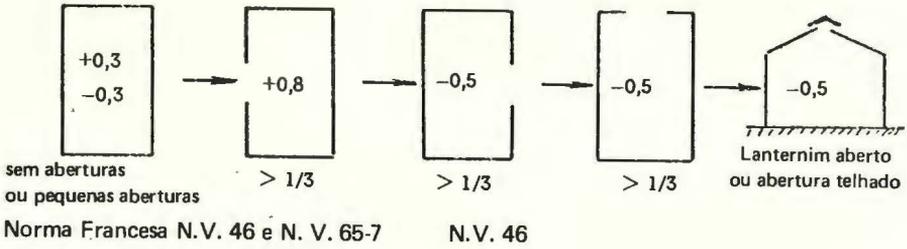
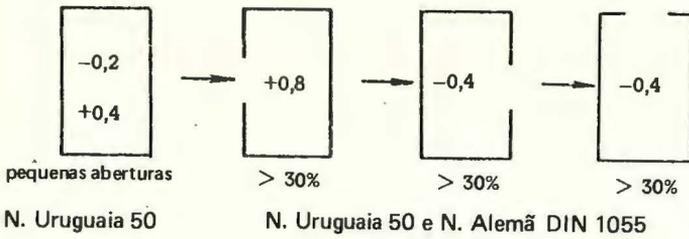


Fig. 10 – Pressão interna. Valores de normas

APÊNDICE

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA

Eng. Pedro Henrique Moura, M. Sc.

A pressão interna que atua em um recinto pode ser calculada pela multiplicação do coeficiente de pressão interna, C_{pi} , pelo valor da pressão dinâmica ao longe. O coeficiente de pressão interna, por sua vez, pode ser determinado através da expressão (1).

$$\sum_{k=1}^N S_k \sqrt{C_{pe_k} - C_{pi}} = 0 \quad (1)$$

onde:

S_k — representa a área de aberturas existente na superfície cujo coeficiente de pressão externa é C_{pe_k} (média nas bordas da abertura);

N — é o número de superfícies com aberturas que têm coeficientes de pressão externa C_{pe_k} ;

C_{pi} — coeficiente de pressão interna;

C_{pe_k} — coeficiente de pressão externa na superfície k .

Esta equação, na prática, apresenta o inconveniente de não se poder explicitar C_{pi} em função de S_k e C_{pe_k} , só podendo ser resolvida por processos numéricos ou por tentativas. Esta última alternativa é admissível somente no caso em que N é pequeno, e assim mesmo, pode ser trabalhosa e demorada.

Pensando em diminuir a dificuldade na determinação de C_{pi} através da expressão (1), desenvolvemos um programa aplicável às principais calculadoras eletrônicas programáveis. Analisamos mais especificamente a HP 67/97, HP41-C e TI 58/59.

O procedimento para o cálculo do C_{pi} adotado no programa consiste em:

– dados os valores de S_k e C_{pek} de cada superfície, calcular o valor da expressão

$$y(C_{pi}) = \sum_{k=1}^N S_k \sqrt{C_{pek} - C_{pi}}$$

Primeiramente para os valores extremos admissíveis, que são $C_{pi} = C_1 = \text{Max } C_{pek}$ e $C_{pi} = C_2 = \text{Min } C_{pek}$.

y será mínimo para $C_{pi} = C_1$

y será máximo para $C_{pi} = C_2$

$y_1 = y(C_1) < 0$ $y_2 = y(C_2) > 0$

Como a solução desejada, $y = 0$, está entre y_1 e y_2 , calculamos novo valor de y com C_{pi} dado por:

$$C_{pi} = \frac{C_1 + C_2}{2} = C_3$$

$y_3 = y(C_3)$

Se $y_3 < 0$, fazemos $C_1 = C_3$.

Se $y_3 > 0$, fazemos $C_2 = C_3$.

Calculamos novo $C_3 = \frac{C_1 + C_2}{2}$, $y_3 = y(C_3)$ e testamos novamente y_3 .

Repetimos este procedimento até atingirmos a precisão requerida, geralmente duas casas decimais.

UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

Os programas para HP 67/97 e para TI 58/59 foram feitos de tal modo que a maneira de utilizá-los é idêntica, divergindo apenas quanto ao tempo de execução.

Uma vez carregado o programa, dado em anexo, podemos usá-lo seguindo o roteiro dado abaixo. Para calculadoras HP 67/97, onde está indicada a tecla 2nd substituir por f.

1 — Pressione a tecla A antes de introduzir um novo conjunto de dados ou ao iniciar o uso do programa. O número zero aparecerá no visor.

2 — Pressione 2nd A se desejar acompanhar a convergência da solução. Estas teclas instruem o programa para mostrar o valor de C_{pi} a cada iteração (não vale para a calculadora HP41C).

3 — Entre com o valor de C_{pe} da superfície k considerada e aperte a tecla B. No visor deverá aparecer o número k de C_{pes} já entrados. Em caso de erro de algum valor, apertando as teclas 2nd B, eliminamos o último valor de C_{pe} entrado e o visor mostra o número correspondente ao último C_{pe} válido. 2nd B pode ser usado repetidamente para anular até todos os valores de C_{pe} .

4 — Entre com o valor da área da superfície correspondente k (em qualquer unidade, mas todas iguais) e aperte C. O programa deverá apresentar o número k de áreas já entradas. Em caso de erro de algum valor, apertando 2nd C eliminamos a última área entrada e o programa mostra o número correspondente à última área válida. 2nd C pode ser usado repetidamente para apagar até todos os valores das áreas. A ordem a ser usada na entrada das áreas tem que corresponder a dos C_{pes} .

5 — Repetir as operações 3 e 4 para todos os pares $C_{pek} - S_k$.

6 — Pressione D e aguarde a solução. No caso de 2nd A ter sido acionada antes, o visor mostrará o valor de C_{pi} em cada iteração. O valor final mostrado tem duas casas decimais exatas.

A utilização do programa na calculadora HP 41C é muito semelhante às outras calculadoras. O roteiro de utilização é o mesmo descrito acima, devendo ser levadas em conta as seguintes particularidades:

— após a entrada do programa, posicionar a calculadora para o início do programa;

— operar no modo USER;

— no modo USER as cinco teclas superiores são equivalentes às teclas A, B, C, D, E das calculadoras HP 67/97;

— o passo 2 do roteiro de utilização não se aplica para o programa da calculadora HP 41C, pois este sempre mostrará a convergência sem que isto diminua a sua rapidez.

Exemplos:

1 – Achar o valor do coeficiente C_{pi} para o prédio da Figura 1, para os valores de C_{pe} e percentagens de abertura de cada face dados na Figura 2. A superfície superior e a inferior são impermeáveis.

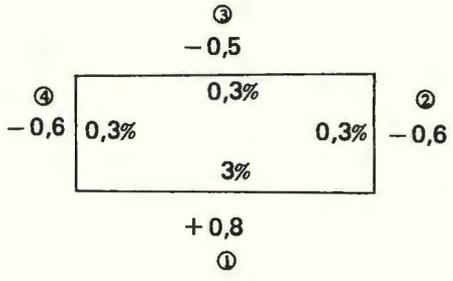
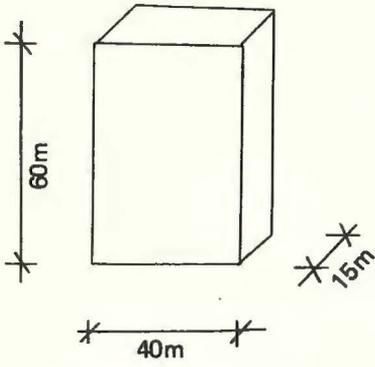


Fig. 1

Fig. 2

superfície:

- 1 $C_{pe_1} = + 0,8$ $S_1 = 40 \cdot 60 \cdot 0,03 = 72m^2$
- 2 $C_{pe_2} = - 0,6$ $S_2 = 15 \cdot 60 \cdot 0,003 = 2,7m^2$
- 3 $C_{pe_3} = - 0,5$ $S_3 = 40 \cdot 60 \cdot 0,003 = 7,2m^2$
- 4 $C_{pe_4} = - 0,6$ $S_4 = 15 \cdot 60 \cdot 0,003 = 2,7m^2$.

Procedimentos	Resultados	Observações
A	0.00	Prepara para início
0.8 B	1.00	
72 C	1.00	Valor de C_{pe} errado. Anula último valor. Valor correto.
0.6 B	2.00	
2nd B	1.00	
-0.6 B	2.00	
2.7 C	2.00	Valor de C_{pi} desejado.
-0.5 B	3.00	
7.2 C	3.00	
-0.6 B	4.00	
2.7 C	4.00	Valor de C_{pi} desejado.
D	0.76	

2 – Achar o C_{pi} para o pavilhão da Figura 3. O pavilhão tem basicamente quatro superfícies com C_{pe} diferentes, cujos valores estão indicados na figura. Na parede frontal existe um portão que ocupa 5% da área da parede e a zona hachurada em diagonal possui uma janela com área correspondente a 1% desta área. O resto das paredes e superfícies é considerado como tendo 0,1% destas áreas de aberturas.

Superfície 1 – $C_{pe_1} = + 0,8 A_1 = 30 \cdot 8 + 15^2 \tan 15^\circ$.

Área de aberturas: $S_1 = 0,05 \cdot 300,29 = 15,01 m^2$.

Superfície 2 – $C_{pe_2} = - 1,0 A_2 = 10(30/\cos 15^\circ + 8 + 8)$.

$S_2 = 0,01 \cdot 470,58 = 4,71 m^2$

Superfície 3 – $C_{pe_3} = - 0,4 A_3 = 2 \cdot A_2$.

$S_3 = 0,001 \cdot 941,16 = 0,94 m^2$.

Superfície 4 – $C_{pe_4} = - 0,2 A_4 = 3A_2 + A_1$.

$S_4 = 0,001 \cdot 1712,03 = 1,71 m^2$.

Procedimentos	Resultados	Observações
A	0.00	Prepara para início. Mostra a conv. da solução.
2nd A	0.00	
0,8 B	1.00	
15.01 C	1.00	
-1.0 B	2.00	
4.71 C	2.00	
-0.4 B	3.00	
0.94 C	3.00	
-0.2 B	4.00	
1.71 C	4.00	
D	-0.10	
	0.35	
	0.58	
	0.46	
	0.52	
	0.49	
	0.50	
	0.51	
	0.51	

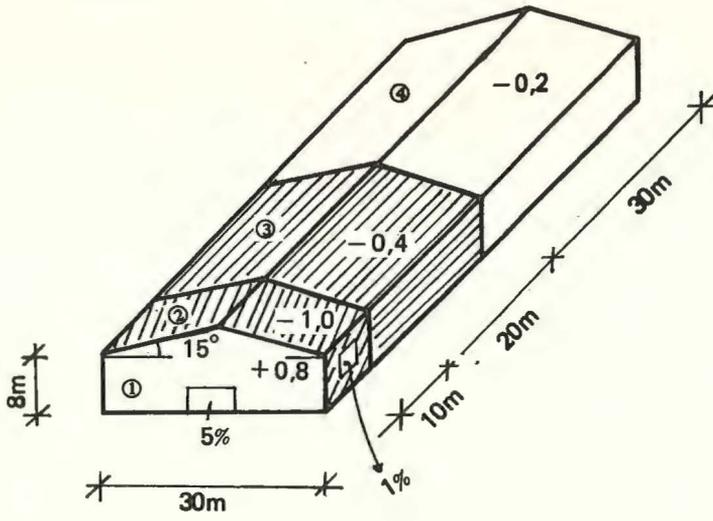


Fig. 3

PROGRAMA PARA CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA

CALCULADORA TEXAS TI 58/59

000	2nd LBL	037	RCL	074	2nd 1
001	2nd A	038	57	075	R/S
002	2nd ST flag	039	2nd $X \geq t$	076	2nd LBL
003	\emptyset	040	2nd 2	077	C
004	R/S	041	$X \geq t$	078	STO
005	2nd LBL	042	STO	079	2nd IND
006	A	043	57	080	58
007	INV	044	2nd LBL	081	2
008	2nd ST flag	045	2nd 2	082	SUM
009	\emptyset	046	2	083	58
010	9	047	SUM	084	GTO
011	9	048	59	085	2nd 4
012	STO	049	GTO	086	2nd LBL
013	56	050	2nd 3	087	2nd C
014	+/-	051	2nd LBL	088	2
015	STO	052	2nd B	089	INV
016	57	053	2	090	SUM
017	2	054	INV	091	58
018	STO	055	SUM	092	2nd LBL
019	59	056	59	093	2nd 4
020	1	057	2nd LBL	094	RCL
021	STO	058	2nd 3	095	58
022	58	059	RCL	096	-
023	CLR	060	59	097	1
024	R/S	061	\div	098	=
025	2nd LBL	062	2	099	\div
026	B	063	-	100	2
027	STO	064	1	101	=
028	2nd IND	065	=	102	R/S
029	59	066	R/S	103	2nd LBL
030	$X \geq t$	067	2nd LBL	104	D
031	RCL	068	2nd \emptyset	105	2nd CP
032	56	069	$X \geq t$	106	RCL
033	2nd $X \geq t$	070	STO	107	57
034	2nd \emptyset	071	56	108	+
035	2nd LBL	072	$X \geq t$	109	RCL
036	2nd 1	073	GTO	110	56

111	=	152	SUM	193	9
112	÷	153	∅∅	194	$X \nlessgtr t$
113	2	154	CLR	195	RCL
114	=	155	$X \nlessgtr t$	196	57
115	STO	156	X	197	2nd FIX
116	55	157	RCL	198	2
117	INV	158	2nd IND	199	EE
118	2nd IF flag	159	∅∅	200	INV
119	∅	160	=	201	EE
120	2nd 5	161	SUM	202	2nd FIX
121	2nd Pause	162	54	203	9
122	2nd LBL	163	2nd DSZ	204	INV
123	2nd 5	164	∅	205	2nd $X = t$
124	CLR	165	2nd 6	206	D
125	STO	166	RCL	207	R/S
126	54	167	54	208	2nd LBL
127	RCL	168	INV	209	2nd 7
128	58	169	2nd $X \geq t$	210	+/-
129	-	170	÷	211	\sqrt{x}
130	1	171	RCL	212	+/-
131	=	172	55	213	GTO
132	STO	173	STO	214	2nd 8
133	∅∅	174	56		
134	2nd LBL	175	GTO		
135	2nd 6	176	X		
136	RCL	177	2nd LBL		
137	2nd IND	178	÷		
138	∅∅	179	RCL		
139	-	180	55		
140	RCL	181	STO		
141	55	182	57		
142	=	183	2nd LBL		
143	INV	184	X		
144	2nd $X \geq t$	185	RCL		
145	2nd 7	186	56		
146	\sqrt{x}	187	2nd FIX		
147	2nd LBL	188	2		
148	2nd 8	189	EE		
149	$X \nlessgtr t$	190	INV		
150	1	191	EE		
151	INV	192	2nd FIX		

PROGRAMA PARA HP 67/97

001	LBL a	039	LBL Ø	076	STO Ø
002	SF Ø	040	STO E	077	RCL D
003	RTN	041	2	078	STI
004	LBL A	042	÷	079	DSZ
005	DSP 2	043	1	080	LBL 2
006	CF Ø	044	—	081	RCL i
007	9	045	RTN	082	RCL A
008	9	046	LBL C	083	—
009	STO B	047	RCL D	084	CF 3
010	CHS	048	STI	085	X < Ø?
011	STO C	049	R↓	086	SF 3
012	2	050	STO i	087	ABS
013	STO E	051	RCL D	088	\sqrt{x}
014	1	052	2	089	F 3?
015	STO D	053	+	090	CHS
016	CLX	054	GTO 1	091	DSZ
017	RTN	055	LBL c	092	RCL i
018	LBL B	056	RCL D	093	X
019	RCL E	057	2	094	ST + Ø
020	STI	058	—	095	DSZ
021	R↓	059	LBL 1	096	GTO 2
022	STO i	060	STO D	097	RCL Ø
023	RCL B	061	1	098	X < Ø?
024	X ≠ Y	062	—	099	GTO 3
025	X ≤ Y?	063	2	100	RCL A
026	STO B	064	÷	101	STO B
027	RCL C	065	RTN	102	GTO 4
028	X ≠ Y	066	LBL D	103	LBL 3
029	X > Y?	067	RCL C	104	RCL A
030	STO C	068	RCL B	105	STO C
031	RCL E	069	+	106	LBL 4
032	2	070	2	107	RCL B
033	+	071	÷	108	RND
034	GTO Ø	072	STO A	109	RCL C
035	LBL b	073	F Ø?	110	RND
036	RCL E	074	PAUSE	111	X ≠ Y?
037	2	075	Ø	112	GTO D
038	—			113	R/S

PROGRAMA PARA HP 41C

001	LBL PRESSÃO	038	STO IND 04	075	X < 0?
002	LBL A	039	2	076	SF 06
003	FIX 2	040	STO + 04	077	ABS
004	99	041	GTO 01	078	SQRT
005	STO 02	042	LBL c	079	FS? 06
006	CHS	043	2	080	CHS
007	STO 03	044	STO - 04	081	DSE 06
008	7	045	LBL 01	082	RCL IND 06
009	STO 04	046	RCL 04	083	X
010	8	047	7	084	STO + 00
011	STO 05	048	-	085	DSE 06
012	CLX	049	2	086	GTO 02
013	STOP	050	/	087	RCL 00
014	LBL B	051	STOP	088	X < 0?
015	STO IND 05	052	LBL D	089	GTO 03
016	RCL 02	053	LBL 20	090	RCL 01
017	X ≠ Y	054	RCL 03	091	STO 02
018	X ≤ Y?	055	RCL 02	092	GTO 04
019	STO 02	056	+	093	LBL 03
020	RCL 03	057	2	094	RCL 01
021	X ≥ Y	058	/	095	STO 03
022	X > Y?	059	STO 01	096	LBL 04
023	STO 03	060	T CPI =	097	RCL 02
024	2	061	ARCL 01	098	RND
025	STO + 05	062	AVIEW	099	RCL 03
026	GTO 00	063	0	100	RND
027	LBL b	064	STO 00	101	X ≠ Y?
028	2	065	RCL 04	102	GTO 20
029	STO - 05	066	.006	103	END
030	LBL 00	067	+		
031	RCL 05	068	STO 06		
032	8	069	DSE 06		
033	-	070	LBL 02		
034	2	071	RCL IND 06		
035	/	072	RCL 01		
036	STOP	073	-		
037	LBL C	074	CF 06		

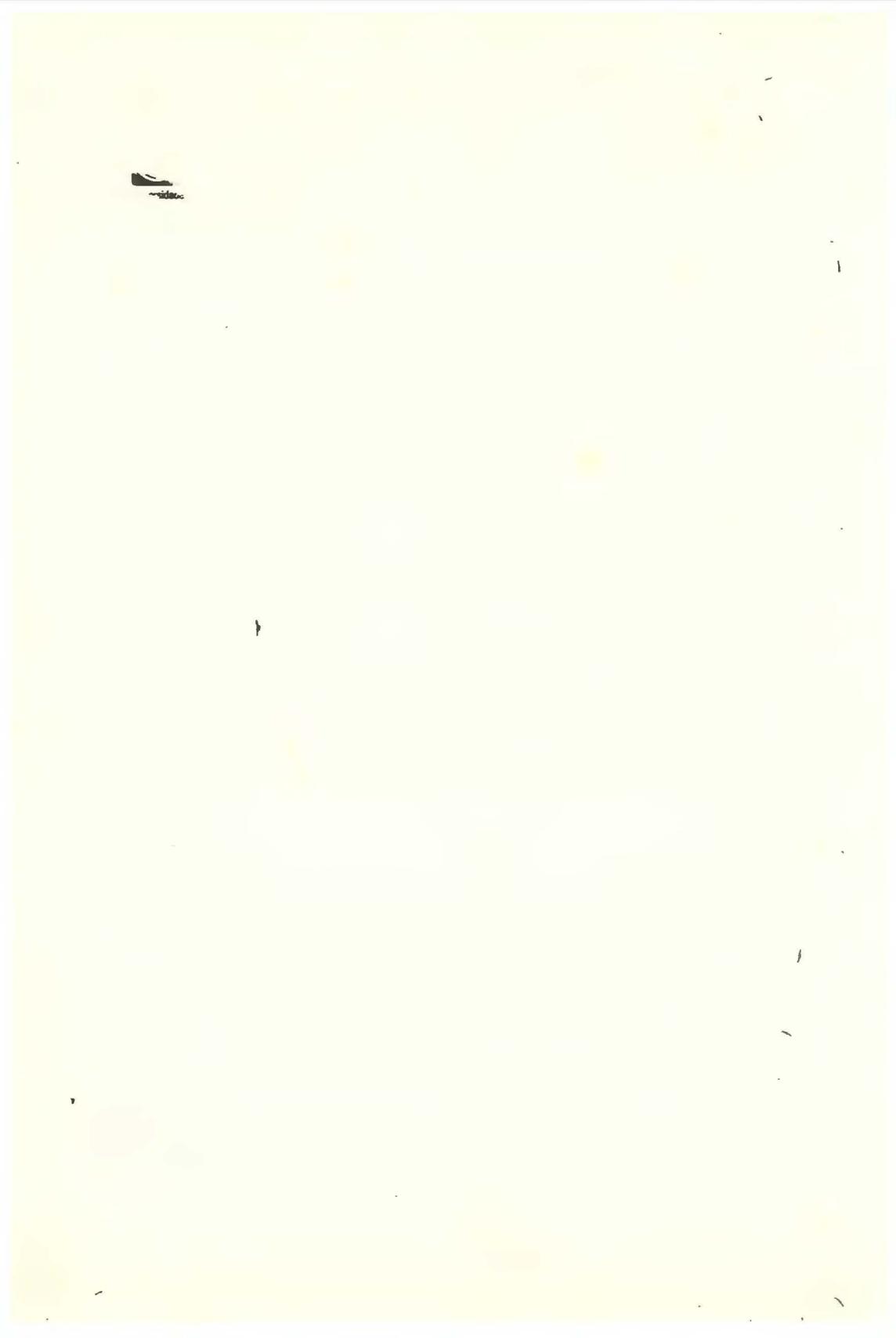
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – 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., 126:1124-98, Oct. 1961.
- 2 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *Norma Brasileira NB-5*. Rio de Janeiro, 1943. 2p.
- 3 – ——— *Norma Brasileira NB-5*. Rio de Janeiro, 1961. apud LANGENDONCK, T. *Comentários à Norma Brasileira NB-1; itens 1 a 13*. São Paulo, ABNT, 1962. p.44-7.
- 4 – ——— *Norma Brasileira NB-599; Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1978.
- 5 – BLESSMANN, J. *Acidentes Causados Pelo Vento*. 2.ed. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978. (Série Engenharia Estrutural, 2).
- 6 – ——— *Comentários de Alguns Tópicos de Norma de Vento*. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975. (Série Engenharia Estrutural, 6).
- 7 – ——— *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).
- 8 – ——— 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.
- 9 – ——— Vento em Cúpulas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 12. e SIMPÓSIO PAN-AMERICANO DE ESTRUTURAS, 3, Caracas, jul. 1967. *Anais*. Caracas, 1967.
- 10 – ——— *Boletim IMME*, Caracas, 5(20):49-100, oct. 1967.
- 11 – ——— *Engenharia no Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 3(19):22-4, 26-8, 30-2, 34-6, nov./dez. 1968. Resumo.

- 12 – BLESSMANN, J. e GERTSENCHTEIN, M. Efeitos do Vento em Armazém da Cia. Docas de Santos. *Estrutura*, Rio de Janeiro, (87):49-59, jun. 1979.
- 13 – 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.
- 14 – BUILDING RESEARCH STATION. Garston. *The assessment of wind loads*. Garston, 1970. 12p. (Digest, 119).
- 15 – ——— *Wind loading on buildings-2*. Garston, 1969. (Digest, 101).
- 16 – ——— *Wind loading on buildings-3*. Garston, 1969. p.1-8. (Digest, 105).
- 17 – 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.
- 18 – CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE. *Calcul des effets du vent sur les constructions*; recommandations. Construction Métallique, n.3, sept. 1979.
- 19 – D'HAVÉ, R. *L'Action du vent sur les bâtiments*. Bruxelles, A.B.E.M., 1965. 11p. (Publication, 321).
- 20 – ——— *Action du vent sur les bâtiments*; rapport 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.
- 21 – 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. 85p.
- 22 – HADDON, J. D. Wind loading on roofs. *Engineering*, London, 184(4782): 559-61, Nov. 1957.
- 23 – HEMPEL, G. *Lastannahmen im Hochbau*. Bruder, 1948. 2v.
- 24 – INSTITUT BELGE DE NORMALISATION, Bruxelles. *Action du vent sur les constructions*; Bâtiments-NBN 460.03. Bruxelles, 1960. 16p.
- 25 – INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. Montevideo. *Norma Uruguay U.N.I.T., norma 50*; Norma para la acción del viento sobre construcciones. Montevideú, 1948. 11p.
- 26 – IRMINGER, J. O. V. e NØKKENTVED, C. *Wind-pressure on buildings*. Experimental Researches, First Series. Copenhagen, 1930.
- 27 – ——— *Wind-pressure on buildings*. Experimental Researches, Second Series. Copenhagen, Naturvidenskabelige Samfund, 1936.
- 28 – NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. Associate Committee, Ottawa. *Handbook of pressure coefficients wind loads*: NRC 6485. Ottawa, 1961. 18p. Supplement, 3.

- 29 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. *Supplement n.4 to the national building code of Canada*. Commentary n.1. 1970.
- 30 – 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.113-49, Paper 13.
- 31 – PRIS, M.R. *L'Action du vent sur les bâtiments et constructions*. Partie I.
- 32 – SEXTON, D.E. *Building aerodynamics*. Garston, Building Research Station, 1968. 6p. (Current Paper 64/68).
- 33 – SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES, Zürich. *Normes techniques n.160: Normes pour les charges, la mise en service et la surveillance des constructions*. Zürich, 1970. 40p.
- 34 – 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.
- 35 – WILSON, J. A. Windstorms and their affect on buildings. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Boston, 38(1):262-71, Jan. 1961.
- 36 – WINDLAST-DIN 1055, *Beton-Kalender*, Berlin, p.516-23, 1956.
- 37 – 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).





PRESSÃO INTERNA

Joaquim Blessmann

Da consideração correta da pressão interna em um pavilhão pode depender a estabilidade de sua cobertura; contrariamente ao admitido em algumas normas de vento, já pequenas aberturas causam pressões internas de considerável valor, afirma o autor.

São apresentados resultados de ensaios que mostram a importância da permeabilidade das paredes e o efeito benéfico de lanternins abertos, de pequena altura. É indicada uma expressão matemática que permite calcular, por aproximações sucessivas, a pressão interna, uma vez conhecida a distribuição das pressões externas, a localização e a área das aberturas. Em apêndice encontra-se programa para este cálculo, que pode ser feito com algumas das calculadoras Texas e Hewlett Packard. Este programa foi desenvolvido pelo Eng.º Pedro Henrique Moura.

Comentários de diversas normas, especialmente da norma brasileira NB-599, também fazem parte do trabalho. Na parte final são descritos dois acidentes típicos, causados por pressão interna, seguindo-se sugestões para a melhoria da estabilidade dos telhados, pelo emprego de elementos construtivos convenientemente colocados.

Joaquim Blessmann é Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Atualmente é professor dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Outras edições urgs

Agonia do Heroísmo
Maria Helena Martins

Economia Mineira Nacional (II):
a Crise Energética Atual
José do Patrocínio Motta

The Finite Element Technique
C.A. Brebbia e A.J. Ferrante

Grelhas Retangulares Simplesmente
Apoiadas
Francisco José San Martín

Modelos Didáticos de Geometria
Euclidiana
Antônio Rodrigues

Narrativa da Perseguição
Hipólito José da Costa

Pensamento em Estruturas
Z.P. Dienes e M.A. Jeeves

Polissemia e Campo Semântico
Gládis K. Rehfeldt

Popularium Sul-Rio-Grandense
Apolinário Porto Alegre

Serviço de Referência e Assistência aos
Leitores
M.G. Martins e M.L. Ribeiro

O Solar do Almirante:
História Pela Arquitetura
Francisco Riopardense de Macedo

Urartu
Sérgio Faraco

Viga Curva Circular Engastada
Danilo Smith e Moacir M. da Silva

Pedidos à
Editora da URGs
Ramiro Barcelos, 2.600 - 1º andar
90000 Porto Alegre (RS)

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL

Joaquim Blessmann

- 1 — **Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas** (2ª edição) — Noções de aerodinâmica; vento em edifícios e cúpulas.
- 2 — **Acidentes Causados Pelo Vento** (2ª edição) — Causas aerodinâmicas e estruturais dos acidentes; exemplos de acidentes; conclusões e recomendações.
- 3 — **Intervalo de Tempo Para Cálculo da Velocidade Básica do Vento** (2ª ed. ampliada) — Intervalo de tempo; mudanças de intervalo de tempo; conclusões e recomendações.
- 4 — **Considerações Sobre Alguns Tópicos Para Uma Norma de Vento** (2ª ed. ampliada) — Ações locais; inclinação do telhado; forma e proporções da construção; interação; resumo
- 5 — **Pressão Interna** (2ª ed. ampliada) — Ensaios; permeabilidade das paredes e lanternins; cálculo da pressão interna; normas; conclusões e recomendações.
- 6 — **Comentários de Alguns Tópicos de Normas de Vento** — Normas francesa, inglesa e belga; relatório da ASCE; conclusões e recomendações.
- 7 — **Efeitos do Vento em Edificações** — Meteorologia: estrutura do vento; aerodinâmica: ação estática e dinâmica do vento; pesquisas em túnel de vento; efeitos nocivos do vento.



Pedidos pelo reembolso postal:

Editora da URS, Rua Ramiro Barcelos, 2.600, 1º andar
90.000 — Porto Alegre — RS

ISBN 85-7025-030-4