

**EFEITOS DO VENTO
EM EDIFÍCIOS E CÚPULAS**

RESERVA TÉCNICA
Editora da UFRGS

JOAQUIM BLESSMANN

- Engenheiro Civil
- Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
- Professor Adjunto da Escola de Engenharia da UFRGS
- Pesquisador-Titular do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq)

efeitos do vento em edifícios e cúpulas

(segunda edição)

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL / 1



editora da urgs
universidade federal do rio grande do sul
porto alegre / 1978

Direitos desta edição:
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Blessmann, Joaquim

Efeitos do vento em edifícios e cúpulas. Porto Alegre,
Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978.

46p. 23cm.

CDU 624.042

CDD 624.175

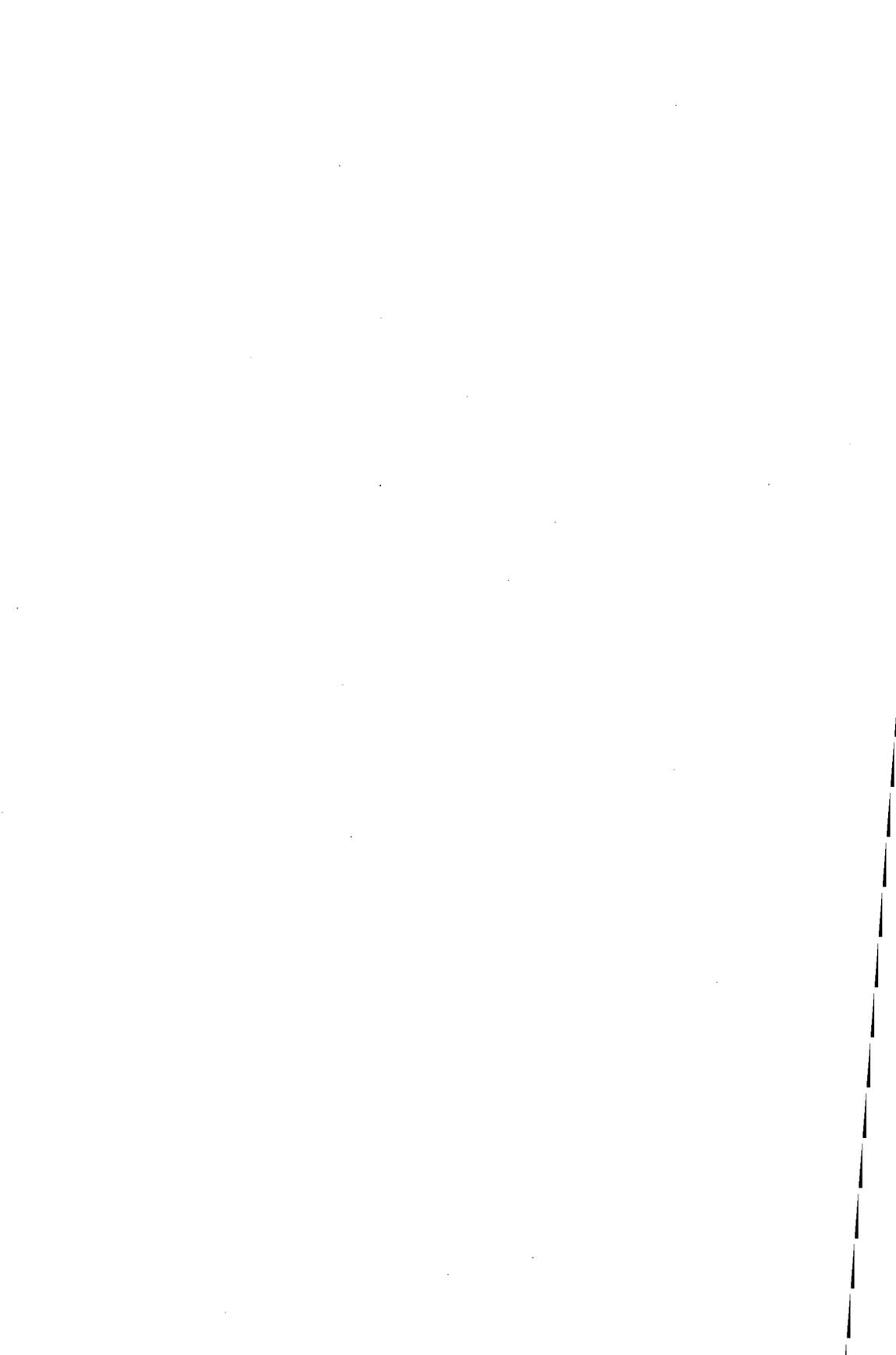
Nº de registro: 3651

Nº de obra: 3165

Data: 25/11/2009

SUMÁRIO

- 1 – Noções de aerodinâmica/9
 - 1.1 – Introdução/9
 - 1.2 – Pressão de obstrução/9
 - 1.3 – Coeficiente de pressão/13
 - 1.4 – Coeficiente de forma/14
 - 1.5 – Coeficiente de força global/14
 - 1.6 – Coeficiente de torção/15
 - 1.7 – Interação/15
- 2 – Vento em edifícios/17
 - 2.1 – Influência da altura/17
 - 2.2 – Influência da profundidade/18
 - 2.3 – Sucções locais/19
 - 2.4 – Coeficiente de arrasto/27
 - 2.5 – Pressão interna/29
- 3 – Vento em cúpulas/33
 - 3.1 – Modelos ensaiados/33
 - 3.2 – Sustentação e arrasto/36
 - 3.3 – Perfis de pressão/38
 - 3.4 – Pressão interna/38
 - 3.5 – Valores locais máximos/42
- Referências Bibliográficas/45



1 – NOÇÕES DE AERODINÂMICA

1.1 – Introdução

O problema do vento em construções pode ser encarado sob três aspectos: meteorológico, aerodinâmico e estrutural.

Estudaremos alguns tópicos do problema aerodinâmico, antecedido de alguns rápidos comentários sobre o problema meteorológico.

1.2 – Pressão de obstrução

a) O conhecido teorema de Bernoulli em suas aplicações aerodinâmicas reduz-se a

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p = \text{constante}, \quad (1)$$

uma vez que o termo ρgz é desprezável por ser pequeno em presença dos demais termos. Este teorema vale para escoamentos incompressíveis. Se for irrotacional, pode-se aplicar entre dois pontos quaisquer do escoamento. Se for rotacional, vale ao longo de uma mesma linha de corrente.

Denominamos de:

- pressão dinâmica ao termo $\frac{1}{2} \rho u^2$
- pressão estática ao termo p
- pressão total à sua soma constante (p_t):

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p = p_t. \quad (2)$$

b) Consideremos o vento ao longe como um escoamento permanente paralelo (Fig. 1), sendo $u_\infty = V$, p_∞ e ρ , respectivamente, a velocidade,

a pressão e a massa específica. Como o ar pode ser considerado como incompressível até velocidade da ordem de 300km/h, ρ será constante em todo o campo aerodinâmico. Colocando-se um sólido neste campo, este sofrerá modificações, sendo que as linhas de corrente se deformam para contornar o obstáculo. Poderemos ter uma ou mais linhas de corrente incidindo normalmente à superfície do sólido. Neste caso a velocidade se anula ($u_e = 0$) e a pressão é toda ela estática: é a chamada pressão de estagnação (p_e), que surge em um ponto de estagnação.

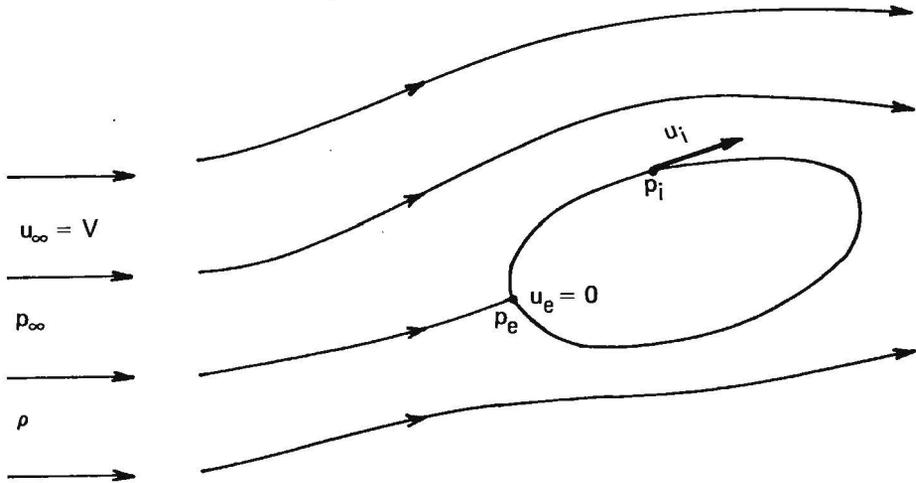


Fig. 1

Aplicando Bernoulli entre um ponto no infinito e o ponto de estagnação:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + p_{\infty} = 0 + p_e$$

ou

$$p_e - p_{\infty} = q = \frac{1}{2} \rho V^2. \quad (3)$$

$p_e - p_{\infty}$ é a pressão efetiva em um ponto de estagnação. Ela era denominada pela antiga Norma Brasileira 5 (NB-5)¹ de *pressão de obstrução*, sendo representada pela letra q . É numericamente igual á pressão dinâmica ao longe.

c) Para o ar em condições normais

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \frac{1,2255 \text{ kgf/m}^3}{9,80665} V^2$$

$$q = \frac{V^2}{16} \quad (4)$$

$q \rightarrow$ em kgf/m²

$V \rightarrow$ em m/s

No Rio Grande do Sul são registrados ventos com velocidade de 130km/h, a 7m de altura (e até mais):

$$V = 130\text{km/h} = 36,1\text{m/s}$$

$$q = V^2/16 = 36,1^2/16 = 82\text{kgf/m}^2.$$

Compare-se com o valor da NB-5, que indica 60kgf/m² entre 6 e 20m. Fazendo-se a correção da altura, a pressão de obstrução a 20m de altura, para vento de 130km/h a 7m de altura, será de 105 a 110kgf/m² em campo aberto. Isto é, um valor quase duplo do da NB-5.

d) Outro fator importante, além da zona geográfica, é o relativo às condições topográficas locais. A altura em que se alcança a velocidade gradiente (em outras palavras: a altura da camada limite da atmosfera) varia muito com os acidentes locais: árvores, morros, casas, etc., fazendo com que a rigor devam-se tomar diferentes valores, conforme estejamos em cidade grande, média, pequena, campo, praia, floresta, etc.

Na Fig. 2 apresentamos alguns casos de perfis da velocidade do vento, conforme trabalho de Davenport.¹³

e) É preciso também levar em conta a duração da rajada. Ela deve durar o suficiente para abranger todo o campo aerodinâmico no entorno da construção. Quanto mais veloz a rajada, menor sua duração. Assim sendo, uma rajada violenta e rápida deverá ser considerada no cálculo de um painel de propaganda, poste, vigas, pórticos ou arcos isolados (ao menos para efeitos locais, nestes últimos), etc. Para uma construção pequena (residência, pequeno pavilhão industrial) será uma rajada de maior duração e, conseqüentemente, de menor velocidade. Esta velocidade será ainda menor ao estudarmos o vento em uma grande cúpula, edifício, ponte, etc. Evidentemente, também aqui, para efeitos locais, será uma rajada mais rápida que interessa.

Os valores de q , portanto, deveriam levar em conta este fato. O valor que fornecemos para o Rio Grande do Sul refere-se a uma rajada de cerca de três segundos de duração. Rajadas mais rápidas não são registradas pelos anemômetros ou anemógrafos geralmente em uso.

f) Um estudo mais detalhado e preciso do problema meteorológico deve levar em conta também a extensão das rajadas, tanto na horizontal como na vertical. Rajadas muito violentas, além de durarem pouco, têm pequena extensão.

g) Para a elaboração da atual norma brasileira de ação do vento, NB-599,² foram apreciados os tópicos indicados nos parágrafos anteriores.

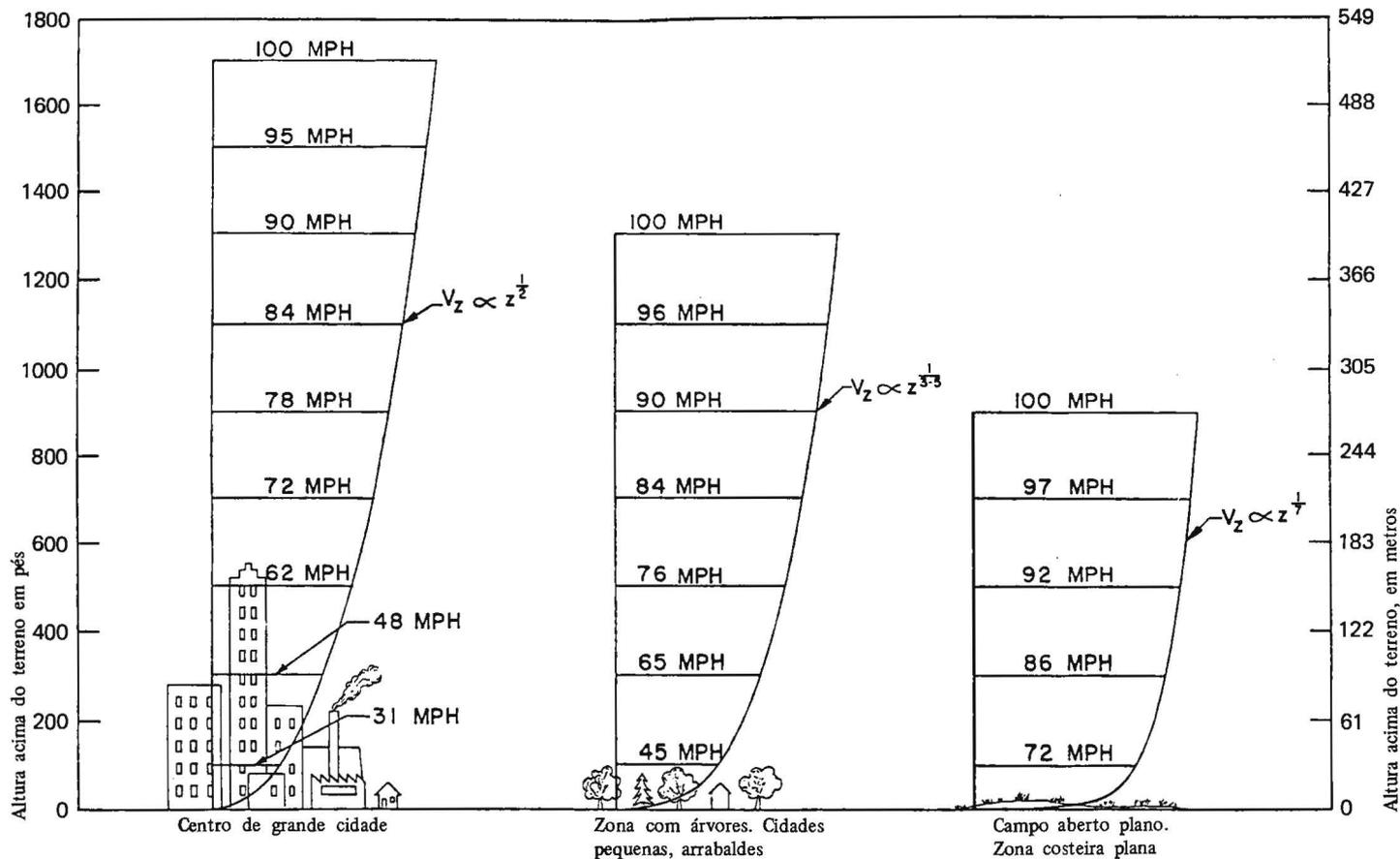


Fig. 2 – Perfis de velocidade média do vento em milhas por hora (MPH)

1.3 – Coeficiente de pressão

a) Apliquemos Bernoulli entre um ponto ao longe e um ponto na superfície do obstáculo, onde a velocidade é u_i e a pressão estática p_i (Fig. 1):

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + p_\infty = \frac{1}{2} \rho u_i^2 + p_i.$$

Chamemos de Δp e a pressão efetiva $p_i - p_\infty$:

$$\Delta p = p_i - p_\infty = \frac{1}{2} \rho (V^2 - u_i^2)$$

$$\Delta p = q \left[1 - \left(\frac{u_i}{V} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Por definição, o *coeficiente de pressão* é dado por

$$c_p = \frac{\Delta p}{q}. \quad (6)$$

Comparando (5) e (6) concluímos que:

$$1 - \left(\frac{u_i}{V} \right)^2 = c_p.$$

b) Vejamos alguns casos particulares:

– o menor valor possível da velocidade é zero

$$\text{para } u_i = 0, c_p = + 1.$$

Portanto, o maior valor do coeficiente de pressão é + 1, valor este que aparece em um ponto de estagnação.

– no caso de

$$u_i = V, c_p = 0.$$

Coeficiente de pressão zero significa, pois, um ponto da superfície do sólido onde a velocidade é igual à velocidade no infinito. Em todos os pontos com velocidades entre estes dois limites a pressão é superior a do infinito: temos uma *sobrepressão*.

– não há um limite superior teórico de u_i

$$\text{para } u_i > V, c_p < 0.$$

Isto é, em todos os pontos da superfície do sólido onde a velocidade é maior que a velocidade do fluxo ao longe teremos uma *sucção* ou *depressão*. Como veremos adiante (2.3), as sucções podem alcançar valores muito superiores, numericamente, às sobrepressões.

c) No caso de sólidos não maciços o coeficiente de pressão (c_p) pode ser subdividido em um coeficiente de pressão externo (c_{pe}), devido às pressões externas, e um coeficiente de pressão interno (c_{pi}), devido às pressões internas:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q}.$$

A soma vetorial dos dois fornece c_p .

1.4 – Coeficiente de forma

a) Aplica-se a uma superfície plana:

$$C = \frac{F}{qA}$$

F → força normal sobre a superfície plana

A → área desta superfície

Como $F = \int_A \Delta p \cdot dA$, teremos, lembrando a (6):

$$C = \frac{\int_A \Delta p \cdot dA}{q} = \frac{1}{A} \int_A c_p \cdot dA. \quad (7)$$

Na prática, o coeficiente de forma é calculado por integração do coeficiente de pressão, de acordo com a expressão acima.

b) Também o coeficiente de forma pode ser subdividido em um coeficiente de forma externo (C_e) e um coeficiente de forma interno (C_i).

1.5 – Coeficiente de força global

$$C_g = \frac{F_g}{qA}$$

F_g → força global: resultante das forças do vento sobre o sólido.

A → área de uma superfície de referência (plano diametral do cilindro, círculo máximo da esfera, secção mestra, etc.).

1.6 – Coeficiente de torção

$$C_t = \frac{M_t}{qAL}$$

M_t → momento de torção em relação ao eixo vertical da construção.

A → área de uma superfície de referência.

L → dimensão característica.

1.7 – Interação

a) Os coeficientes aerodinâmicos dados acima variam muito com as condições de vizinhança. Um obstáculo colocado nas proximidades da construção em estudo pode afetar grandemente o campo aerodinâmico. Muitas vezes esta alteração é benéfica, outras vezes não.

Assim, por exemplo, Harris¹⁷ verificou, em ensaio em túnel aerodinâmico, que dois edifícios que seriam construídos nas proximidades do Empire State Building praticamente duplicariam os esforços de torção na parte inferior deste último (até a altura dos edifícios projetados).

Bailey e Vincent,³ em seus clássicos ensaios sobre este tema, constataram, entre outras alterações, um aumento das sucções nos telhados e das sobrepressões nas paredes de construções vizinhas.

Ensaio realizados em Iowa,¹⁰ em construções baixas e alongadas, indicaram um grande aumento das sucções nas paredes adjacentes de duas construções colocadas próximas e paralelas (para certas orientações do vento). Fenômeno análogo foi observado por nós, estudando dois edifícios vizinhos (modelos em túnel de vento).

Na Bélgica, o estudo de dois edifícios vizinhos e em fluxo bidimensional (altura infinita) mostrou que a força global em um destes edifícios é diminuída pela presença de outro nas proximidades. Fenômeno idêntico foi por nós observado nos ensaios citados anteriormente.

Estudos em desenvolvimento no Laboratório de Aerodinâmica das Construções, do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sobre dois modelos

paralelepípedicos com proporções 1 x 1 x 6, em 15 posições relativas de vizinhança, confirmam o agravamento das sucções locais, forças e momentos de torção para certos afastamentos e incidências do vento. Os primeiros resultados foram apresentados nas XIX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural.⁸

b) O fenômeno de interação se faz sentir também entre os diversos elementos planos ou curvos de uma mesma construção. Em outras palavras: valores obtidos para uma superfície *isolada*, por exemplo, não podem ser usados quando há outras superfícies justapostas e vice-versa.

A Fig. 3a mostra a variação na forma do fluxo em uma placa plana AB quando uma outra placa plana AC é colocada ao lado, em diversos ângulos. Alterando-se a forma do fluxo, altera-se a velocidade e, conseqüentemente, também os coeficientes aerodinâmicos anteriormente definidos. A Fig. 3b procura ilustrar este fenômeno com casos comuns de interação.

Não é possível, portanto, aplicar uma fórmula como a da NB-5 ($C_e = 1,2 \text{ sen } \alpha - 0,5$) a qualquer construção.

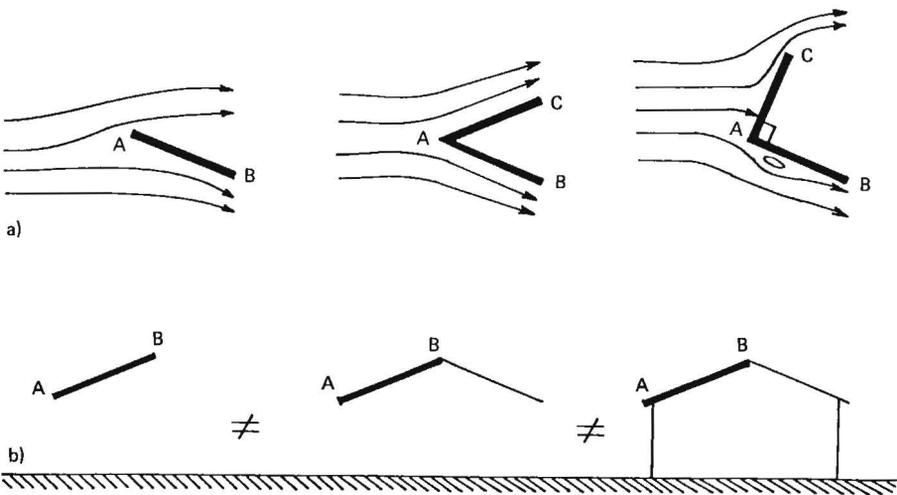


Fig. 3

Mesmo para o caso de telhados e paredes verticais de construções comuns, a que se aplica melhor a fórmula acima, trata-se de um valor médio e aproximado. Para valores mais precisos é preciso levar em conta que as pressões variam em uma mesma superfície plana, que a altura da parede influi, bem como a largura e profundidade da construção; também a rugosidade do terreno, etc.

2 – VENTO EM EDIFÍCIOS

2.1 – *Influência da altura*

A NB-5 define *largura média* como a menor largura média medida em qualquer direção. O conceito de largura média é usado no caso de construções com fachadas não retangulares (escalonadas, trapezoidais ou curvas). Vem a ser a largura do retângulo de mesma altura e mesma área de fachada (ou da projeção paralela da construção sobre o plano da fachada).

Está errada a norma quando diz que é *a menor largura média medida em qualquer direção*. Aerodinamicamente interessa conhecer principalmente a altura relativa; a largura é de importância secundária.

A altura relativa é medida pelo Alçamento E, dado por

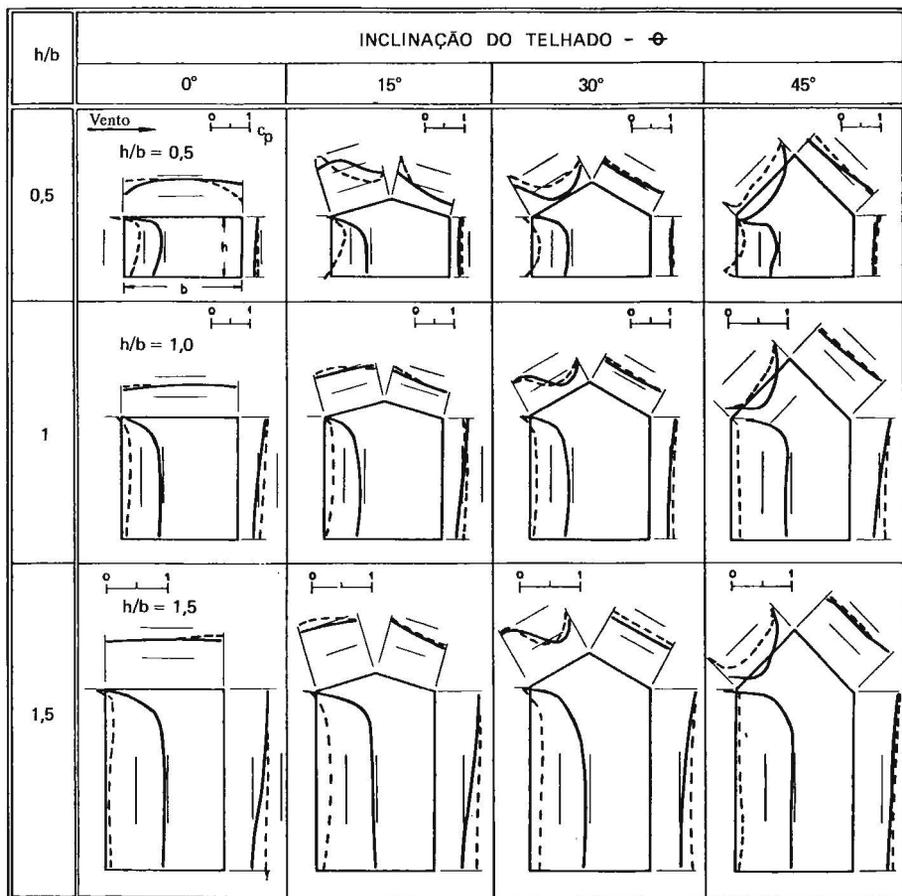
$$E = \frac{h}{\ell}$$

sendo ℓ a dimensão perpendicular à direção do vento (vento incidindo normal ou quase normalmente a uma das fachadas). Vem a ser a largura no conceito subjetivo que dela temos: é a dimensão perpendicular a nosso raio visual, quando observamos o edifício de barlavento.

Quanto mais *alteada* a construção, isto é, quanto maior seu Alçamento, maior o esforço do vento. Por exemplo, para um edifício de planta quadrada temos:

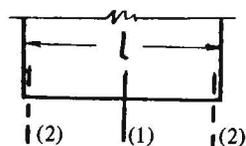
$$\begin{array}{cccccc} E = \frac{1}{2} & 3 & 5 & 10 & \infty \\ C_g = 0,94 & 1,50 & 1,55 & 1,64 & 2,00. \end{array}$$

A influência do Alçamento se faz sentir principalmente na parte do edifício situada na esteira. A parede de barlavento é pouco influenciada. Na Fig. 4 podem ser vistos diversos perfis de pressão tirados dos ensaios realizados em Iowa, por Chien, Feng, Wang e Siao.¹⁰



Secção média: ——— (1)

Secções próximas às bordas: - - - - - (2)



↑
Vento

Fig. 4 – Pressões em modelos de construções. Vento a 90°.
Relação $l/b = 1$

2.2 – Influência da profundidade

a) Também a profundidade relativa influi bastante nos esforços exercidos pelo vento. Definimos como *Profundez* Pr a relação entre a profundidade e a menor dimensão da fachada perpendicular ao vento (ou da projecção paralela da construção sobre esta fachada).

Para um Alçamento de 10, encontramos os seguintes valores⁹ para o coeficiente de forma externo na parede de sotavento, o vento incidindo normalmente à fachada menor:

$$\begin{array}{cccc} Pr = & 1 & 2,5 & 5 & 10 \\ C_e = & -0,88 & -0,53 & -0,20 & -0,22. \end{array}$$

A sobrepressão na fachada de barlavento não sofre influência sensível da Profundidade, situando-se o valor de C_e correspondente em torno de + 0,76.

Dos valores dados acima conclui-se que as sucções a sotavento vão diminuindo até uma Profundidade 5. A partir daí aumentaram um pouco.

b) A norma francesa NV-65,¹² baseada nos ensaios de Pris, a partir de $Pr = 4$, toma um valor constante para as sucções a sotavento, dadas pela expressão

$$C_e = -(1,3 \gamma_0 - 0,8)$$

sendo

$$\gamma_0 = 0,85 \text{ a partir de } Pr = 4.$$

Portanto:

$$C_e = -(1,3 \cdot 0,85 - 0,8) = -(1,10 - 0,80)$$

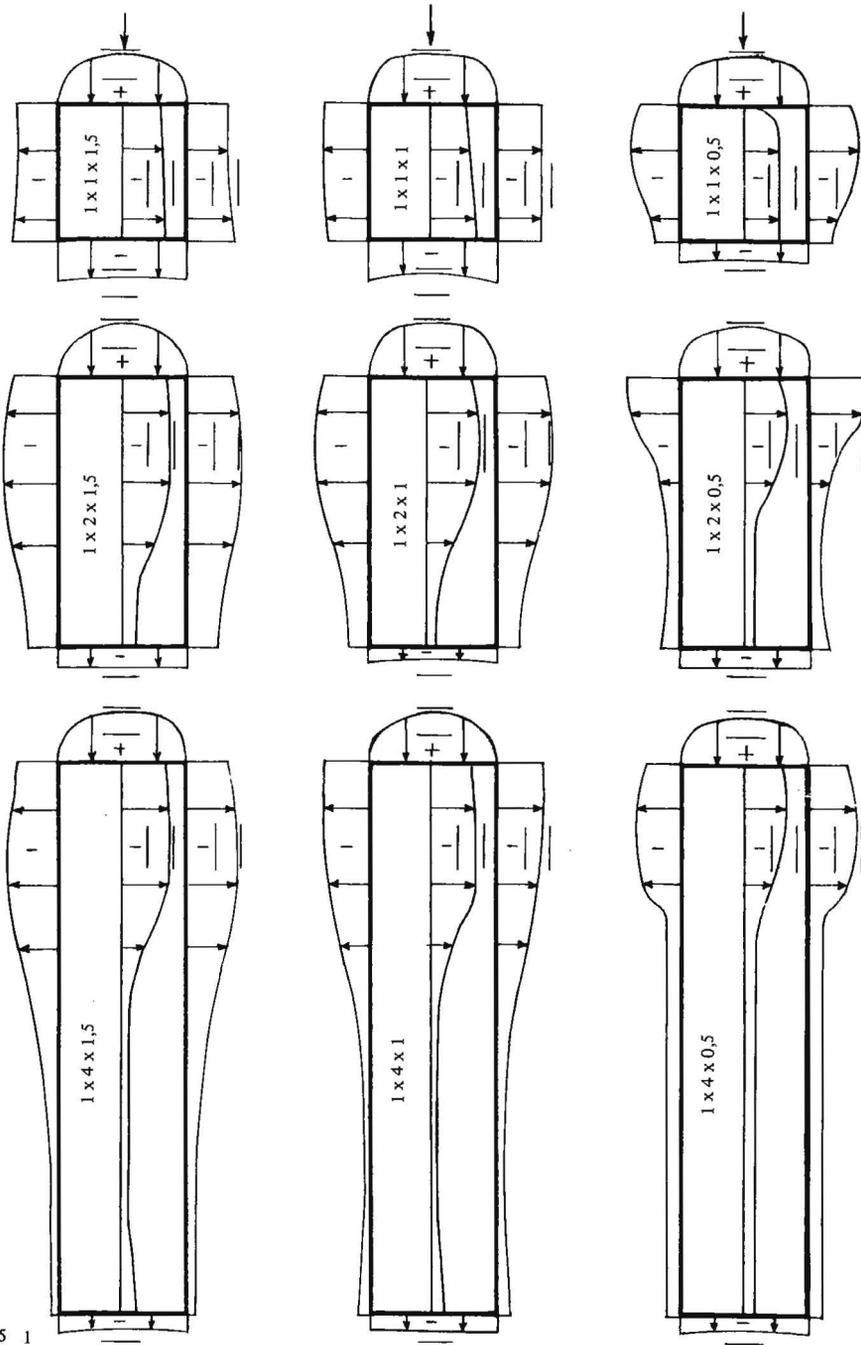
$$C_e = -0,30.$$

c) Nos já citados ensaios de Iowa, em construções baixas, para $Pr = 4$, os valores locais c_{pe} variaram de -0,20 a -0,32. Alguns perfis de pressão horizontais, extraídos dos ensaios de Iowa, aparecem na Fig. 5.

2.3 – Sucções locais

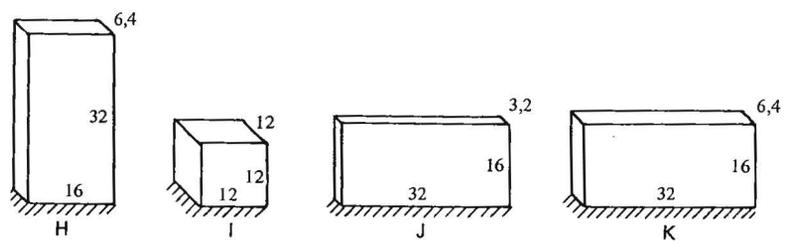
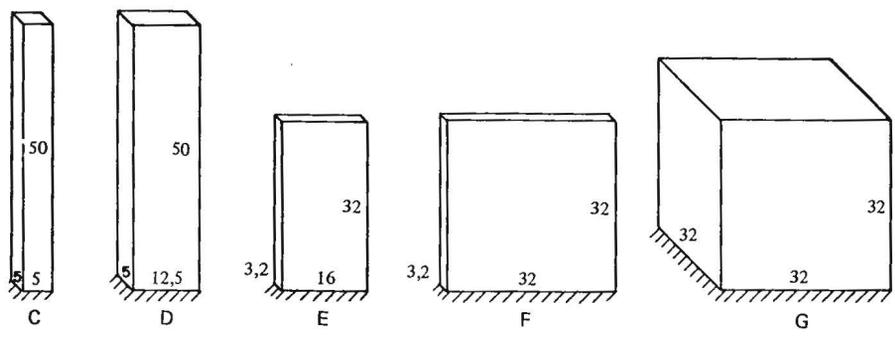
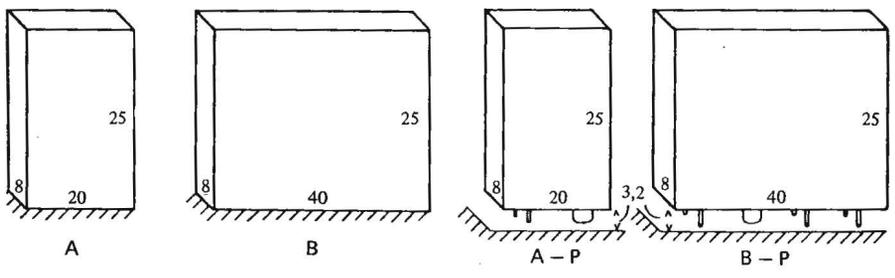
a) Na mesma Fig. 5 podem-se observar as altas sucções que surgem lateralmente na zona mais de barlavento. Na Fig. 6 aparece a série de modelos que ensaiamos em 1963.⁹ Nestes ensaios foram observados valores muito altos de sucções locais e de sucções em certas zonas de alguns modelos, para certas incidências do vento.

Na Fig. 7 temos o modelo J, no qual as sucções laterais com vento axial chegaram a $C_e = -0,9$. Notável é o efeito de asa obtido neste modelo com vento a 15° e, principalmente, a 30° : as sucções a sotavento



0,5 1
 Cp

Fig. 5 – Perfis de pressão



Dimensões nominais em cm

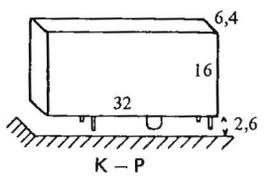


Fig. 6 – Modelos

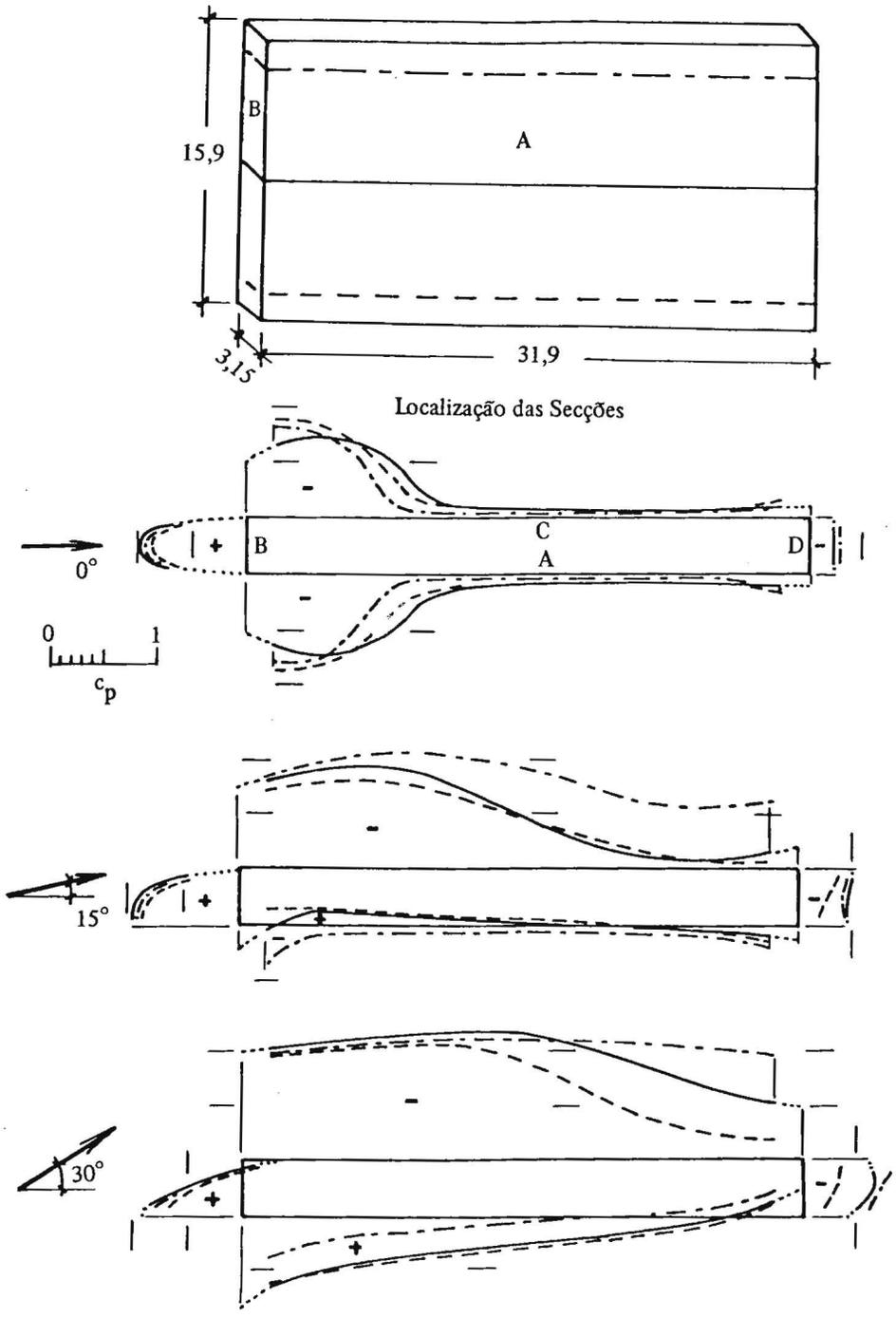


Fig. 7 – Perfis horizontais de pressão

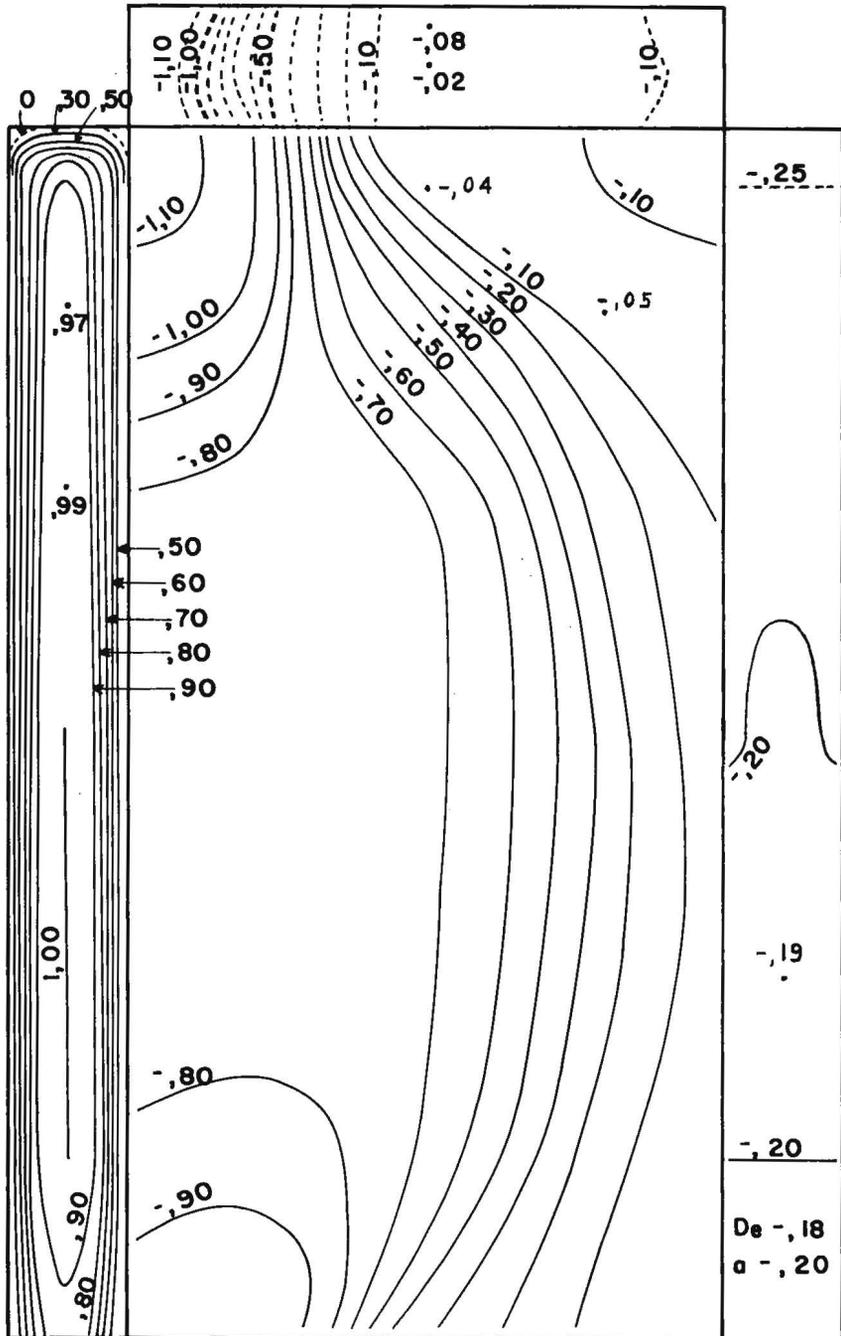


Fig. 8 – Modelo E

chegaram a - 1,2. Repare-se também na forte assimetria de esforços nestes dois casos, ocasionando momentos de torção consideráveis.

Para o modelo F, com vento axial, as sucções laterais foram ainda maiores: - 1,0. Com o vento inclinado de 5° em relação ao eixo longitudinal do modelo, a sucção lateral atingiu - 1,16.

Curvas isobáricas do modelo E, com vento axial, aparecem na Fig. 8. Fortes sucções aparecem nas proximidades das quinas superiores mais de barlavento, tanto nas faces laterais como na face superior do modelo.

b) Do que foi exposto podemos concluir que o valor - 0,5, dado pela NB-5, é demasiadamente baixo, principalmente quando se trata de estudar efeitos locais (dimensionamento e ancoragem de elementos de vedação e da estrutura secundária correspondente, por exemplo).

c) Picos localizados de pressão ainda maiores são constatados na face superior, causados pelos vórtices do topo. Em nossos ensaios, acima mencionados, medimos $c_{pe} = - 3,60$ na parte dianteira do topo do modelo H, vento incidindo a 45°. Aplicando-se este coeficiente a um edifício de 60m de altura, com $q = 100\text{kg/m}^2$, concluímos que a força de sucção atinge 360kgf/m^2 .

Nos ensaios de Iowa,¹⁰ em construções baixas, foi encontrado um valor muito superior: - 7,4.

d) A influência da interação entre as diferentes faces de uma construção é claramente vista nos ensaios do Edifício Pirelli, de Milão. As sucções são muito superiores ao valor - 0,5 da norma: alcançou-se uma sucção de - 2,86! (vento a 15° com eixo horizontal maior do edifício). Além disso, observou-se um nítido efeito de asa, tanto nas distribuições das sobrepressões e sucções, como também no fenômeno aerodinâmico do *estol*, isto é, descolamento da corrente de ar quando o ângulo de ataque é exagerado (a cerca de 15°). Resultou também uma componente do esforço horizontal contra o sentido do vento (ver Fig. 9). Note-se também os fortes valores de torção, provenientes desta assimetria de sobrepressões e depressões. Na Fig. 9 aparecem, além dos perfis de pressão para a zona central do edifício e para as proximidades do terreno, também os valores dos coeficientes por unidade de altura:

$$c_m \rightarrow \text{coeficiente de torção por unidade de altura} = \frac{m_t}{q\ell^2} .$$

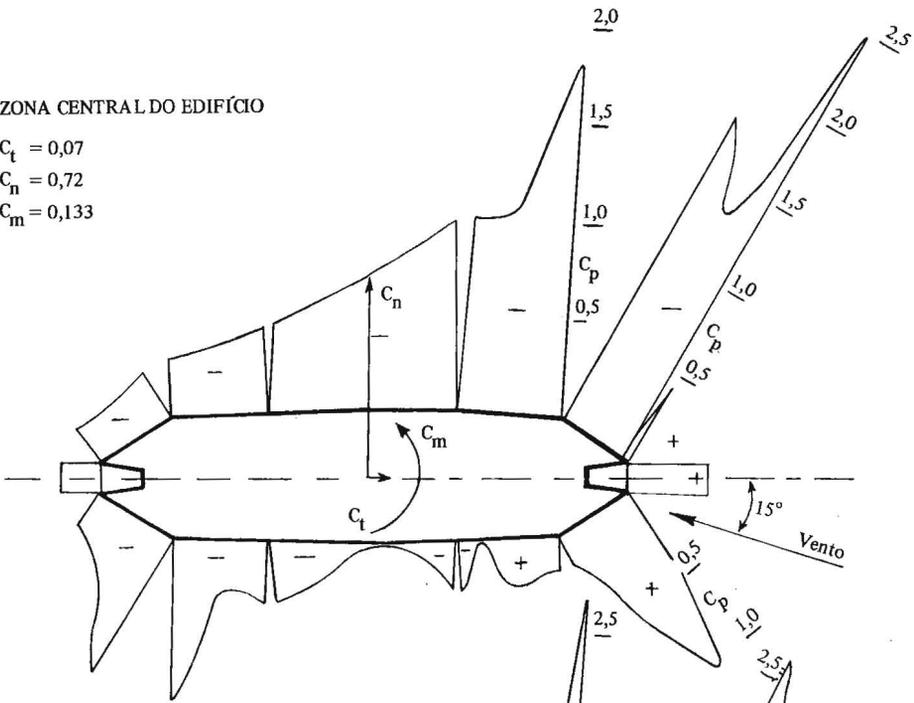
m_t → momento de torção por unidade de altura.

ℓ → dimensão longitudinal do modelo (eixo maior da base).

c_n → coeficiente de força normal por unidade de altura

ZONA CENTRAL DO EDIFÍCIO

$C_t = 0,07$
 $C_n = 0,72$
 $C_m = 0,133$



ZONA PRÓXIMA AO TERRENO

$C_t = 0,04$
 $C_n = 0,67$
 $C_m = 0,168$

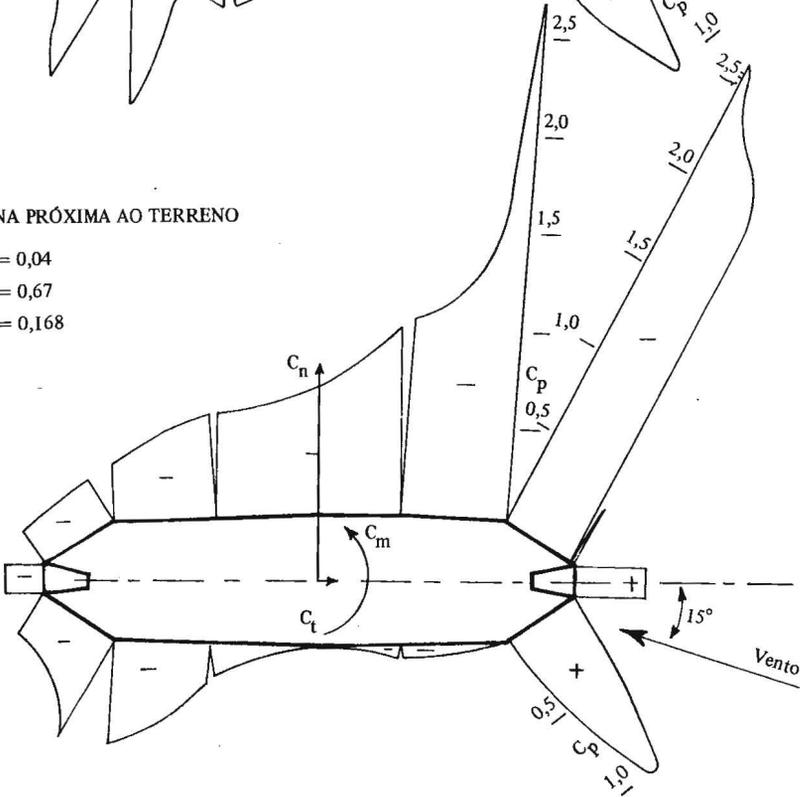


Fig. 9 – Edifício Pirelli – Milão

$$c_n = \frac{f_n}{q\ell}.$$

f_n → componente da força horizontal do vento, normal à ℓ , por unidade de altura.

c_t → coeficiente de força tangencial por unidade de altura

$$c_t = \frac{f_t}{q\ell}.$$

f_t → componente da força horizontal do vento na direção ℓ , por unidade de altura.

Também foram calculados os valores médios globais dos coeficientes acima, aplicáveis a todo o edifício:

$$C_m = M_t/q \cdot \ell \cdot A$$

$$C_n = F_n/q \cdot A$$

$$C_t = F_t/q \cdot A.$$

Os valores obtidos foram:

Para o estol:

$$C_n = 0,650$$

$$C_t = 0,015$$

$$C_m = 0,142$$

Para vento frontal (perpendicular à fachada maior):

$$C_n = 0,94$$

$$C_t = 0$$

$$C_m = 0$$

e) O Edifício Pirelli é um caso típico que mostra o grande erro a que se pode chegar simplesmente aplicando a fórmula da NB-5 ($1,2 \text{ sen } \alpha - 0,5$ ou $1,6 \text{ sen } \alpha - 0,5$, conforme o caso) indistintamente a qualquer caso de superfícies planas. A direção mais nociva não é normal a nenhuma das superfícies planas da fachada poligonal, mas sim uma direção quase axial, para os efeitos de torção e de sucções: é o chamado *efeito de asa*.

O que podemos concluir é que os valores fornecidos pelas normas não podem ser extrapolados, aplicando-os a formas *estranhas*. Estas deveriam ser ensaiadas em túnel de vento.

f) Mesmo em edifícios de secção quadrada aparecem efeitos de torção, como pode ser constatado na Fig. 10, que reproduz resultados de ensaios de Dryden e Hill.¹⁵

g) Forças contra o sentido do vento apareceram também em outros ensaios. Irminger e Nøkkentved,¹⁸ ensaiando modelo de cons-

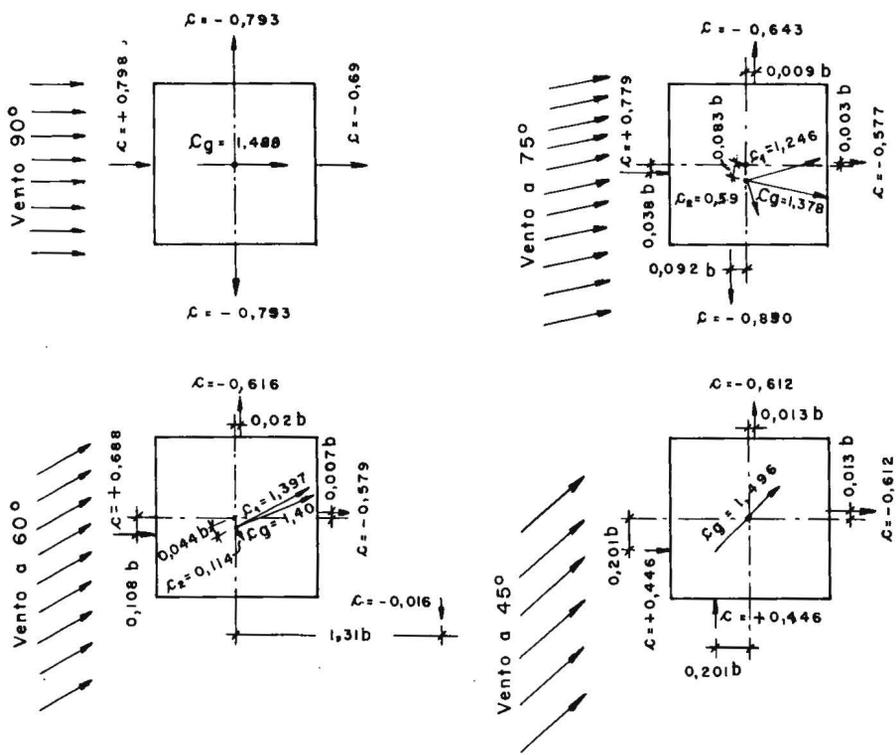


Fig. 10 – Valores de c , c_g e excentricidades.

Prisma 1 x 1 x 3 montado em plataforma

trução com telhado a duas águas, inclinação de 20°, obtiveram na água de barlavento $C_e = -0,71$ e na de sotavento $C_e = -0,36$. Conseqüentemente, a componente horizontal dos esforços do vento no telhado é de sentido contrário ao do vento. Fenômeno análogo encontramos em cúpula, como veremos adiante.

h) Valores elevados de sucção aparecem também em marquises de estádios e hipódromos. A norma suíça²⁰ indica sucções que chegam a -2,0, vento a 45°, para ações locais em certas zonas da marquise.

2.4 – Coeficiente de arrasto

a) A força de arrasto é a componente horizontal, na direção do vento, das forças exercidas pelo vento sobre o obstáculo. No caso de

construções paralelepípedicas, com o vento incidindo normalmente a uma das fachadas, a força de arrasto coincide com a resultante horizontal das forças do vento.

$$C_a = \frac{\text{arrasto}}{q \cdot A}$$

A → área da fachada perpendicular à direção do vento.

QUADRO 1 – Coeficiente de Arrasto (C_a)

Modelo e Dimensões $\ell \times b \times h$	α	E	Valores de C_a				
			NB-5	NV-46	NV-65	Pris	Autor
A 20 x 8 x 25	90°	1,25	1,2	1,30	1,30	1,25	1,29
	0°	3,1	1,2	1,32	1,22	1,17	1,12
B 40 x 8 x 25	90°	0,63	1,2	1,30	1,30	1,24	1,33
	0°	3,1	1,2	1,32	1,10	1,00	0,95
C 5 x 5 x 50	0°	10	1,6	1,58	1,70	1,70	1,64
D 12,5 x 5 x 50	90°	4	1,2	1,36	1,36	1,33	1,35
	0°	10	1,6	1,58	1,28	1,24	1,30
E 16 x 3,2 x 32	90°	2	1,2	1,30	1,30	1,23	1,33
	0°	10	1,6	1,58	1,10	1,00	0,98
F 32 x 3,2 x 32	90°	1	1,2	1,30	1,30	1,21	1,29
	0°	10	1,6	1,58	1,10	1,00	1,00
H 16 x 6,4 x 32	90°	2	1,2	1,30	1,30	1,25	1,33
	0°	5	1,4	1,41	1,23	1,20	1,20
J 32 x 3,2 x 16	90°	0,5	1,2	1,30	1,30	1,23	1,25
	0°	5	1,4	1,41	1,10	1,00	1,01
K 32 x 6,4 x 16	90°	0,5	1,2	1,30	1,30	1,25	1,27
	0°	2,5	1,2	1,30	1,10	1,00	0,96

$\alpha = 0^\circ$: vento paralelo à dimensão ℓ
 $\alpha = 90^\circ$: vento perpendicular à dimensão ℓ
 E → Alçamento = h/ℓ para $\alpha = 90^\circ$
 = h/b para $\alpha = 0^\circ$

b) No Quadro 1 apresentamos os resultados que obtivemos em nossos ensaios com formas paralelepípedicas, bem como os valores calculados aplicando a NB-5 (com o conceito correto de largura média), norma francesa de 1946 (NV-46),¹⁶ norma francesa de 1965 (NV-65)¹² e ensaios de Pris,¹⁹ em que as últimas normas citadas se basearam. Todos os ensaios acima citados foram feitos em vento uniforme.

Como pode se constatar, é boa a concordância dos dois grupos de resultados experimentais, feitos independentemente na mesma época. A diferença deve-se às peculiaridades de cada túnel aerodinâmico e principalmente, cremos nós, ao fato de Pris ensaiar seus modelos muito próximo da borda de ataque da plataforma, o que não está muito correto, conforme demonstrou D'Havé,¹¹ da Bélgica.

O ângulo de 90° corresponde a vento normal à fachada maior e 0° a vento normal à fachada menor.

2.5 – Pressão interna

a) Não são satisfatórios os valores apresentados pela NB-5:¹

“a) Em superfícies planas, cheias, de construções abertas a barlavento → $C_i = + 0,5$.

b) Em superfícies planas, cheias, de construções abertas a sotavento ou em planos paralelos à direção do vento → $C_i = -0,5$.”

b) Estes valores são muito baixos. Tomemos a norma francesa NV-46¹⁶ ou a NV-65,¹² que manteve a NV-46 para certos casos simples:

“1) Construções sem aberturas ou com pequenas aberturas uniformemente repartidas:

$$C_i = + 0,3 \text{ e } -0,3.$$

Para o cálculo de ações locais (até 5m²) e de peças secundárias:

$$C_i = + 0,8 \text{ e } -0,5.$$

2) Construções com grandes aberturas (maior que 1/3 da área da parede):

2.a) aberturas só a barlavento → $C_i = + 0,8$

2.b) aberturas na esteira → $C_i = - 0,5$

Para o cálculo de ações locais (até 5m²) e de peças secundárias:

$C_i = + 1,0$ e $-0,7$, respectivamente."

Temos duas observações a fazer:

1º — D'Havé¹⁴ mostrou que para uma permeabilidade de parede variando de 5 a 50% não há alteração nas pressões internas. Whitbread e Packer²¹ constataram que com 1% de permeabilidade as pressões internas estão próximas de seus valores extremos. Já a partir de 3% deve-se considerar a construção com *grandes aberturas*. Para maiores detalhes ver Blessmann, *Pressão Interna*.⁷

2º — O aumento em C_i para ações locais e peças secundárias é feito para levar em conta que não é uniforme a pressão externa. A norma NV-46, para não modificar os coeficientes externos, fazia correção na pressão interna, embora não corresponda a uma realidade física.

c) Para destacar a grande diferença entre os valores de nossa norma e os valores reais, consideremos um pavilhão com telhado curvo ou a duas águas, bem mais profundo que largo, vento incidindo axial ou quase axialmente.

Pela NB-5 → $C_i = + 0,5$; $C_e = - 0,5$.

Total (força para o exterior): $C = 1,0$.

Por ensaios e NV-65:

$C_i = + 0,8$; $C_e = - 1,1$ (dependendo das proporções).

Total (força para o exterior): $C = 1,9$.

Isto é, um valor praticamente duplo do da norma até há pouco usada no Brasil.

d) Esta diferença explica o colapso de muitas estruturas. Dois casos típicos temos no Rio Grande do Sul. Em ambos a estrutura do telhado era constituída por treliças metálicas, leves. O esforço ascensional do vento (*sustentação*), muito superior ao peso próprio da estrutura e cobertura do telhado, inverteu o sentido dos esforços nos apoios e nas barras das treliças.

Na primeira das estruturas acidentadas os arcos eram triarticulados e os vínculos externos eram incompletos, aptos a absorver apenas empuxos dirigidos para fora. Com a inversão do empuxo os extremos das treliças correram para dentro da construção, ao mesmo tempo que a cumeeira era levantada pela força ascensional do vento, seguindo-se o tombamento de todo o telhado dentro do pavilhão.

No segundo caso as treliças estavam bem vinculadas em seus apoios, mas as barras inferiores tinham sido calculadas apenas para esforços de tração. A inversão dos esforços ocasionou o colapso da estrutura por flambagem das barras inferiores.

3 – VENTO EM CÚPULAS

3.1 – Modelos ensaiados

Algumas breves notas sobre ensaios que realizamos em cúpulas, no túnel aerodinâmico de 2m do Centro Técnico Aeroespacial São José dos Campos, SP.

As duas séries de modelos ensaiados, num total de 16, aparecem nas Figs. 11 e 12. Fotografias de dois deles aparecem na Fig. 13.

Os ensaios tiveram por objetivo estudar, em uma corrente de ar uniforme:

- efeito da flecha relativa da cúpula: $f/D = 1/8$ (série I → cúpula rebaixada) e $1/4$ (série II → cúpula alteada).
- efeito da distância entre cúpula e solo, ensaiando três posições:
 - 1º – afastamento nulo: cúpula assente na plataforma;
 - 2º – afastamento médio: cúpula sobre pilares ou paredes de 3cm de altura;
 - 3º – afastamento grande: cúpula sobre pilares ou paredes de 6cm de altura.
- efeitos da permeabilidade da parede, para os itens 2º e 3º dados acima:
 - 1º – parede normalmente fechada (porém não estanque);
 - 2º – parede com muitas aberturas uniformemente distribuídas;
 - 3º – parede com um portão e permeabilidade normal;
 - 4º – parede com dois portões e permeabilidade normal;
 - 5º – parede com dois portões e aberturas uniformemente distribuídas.

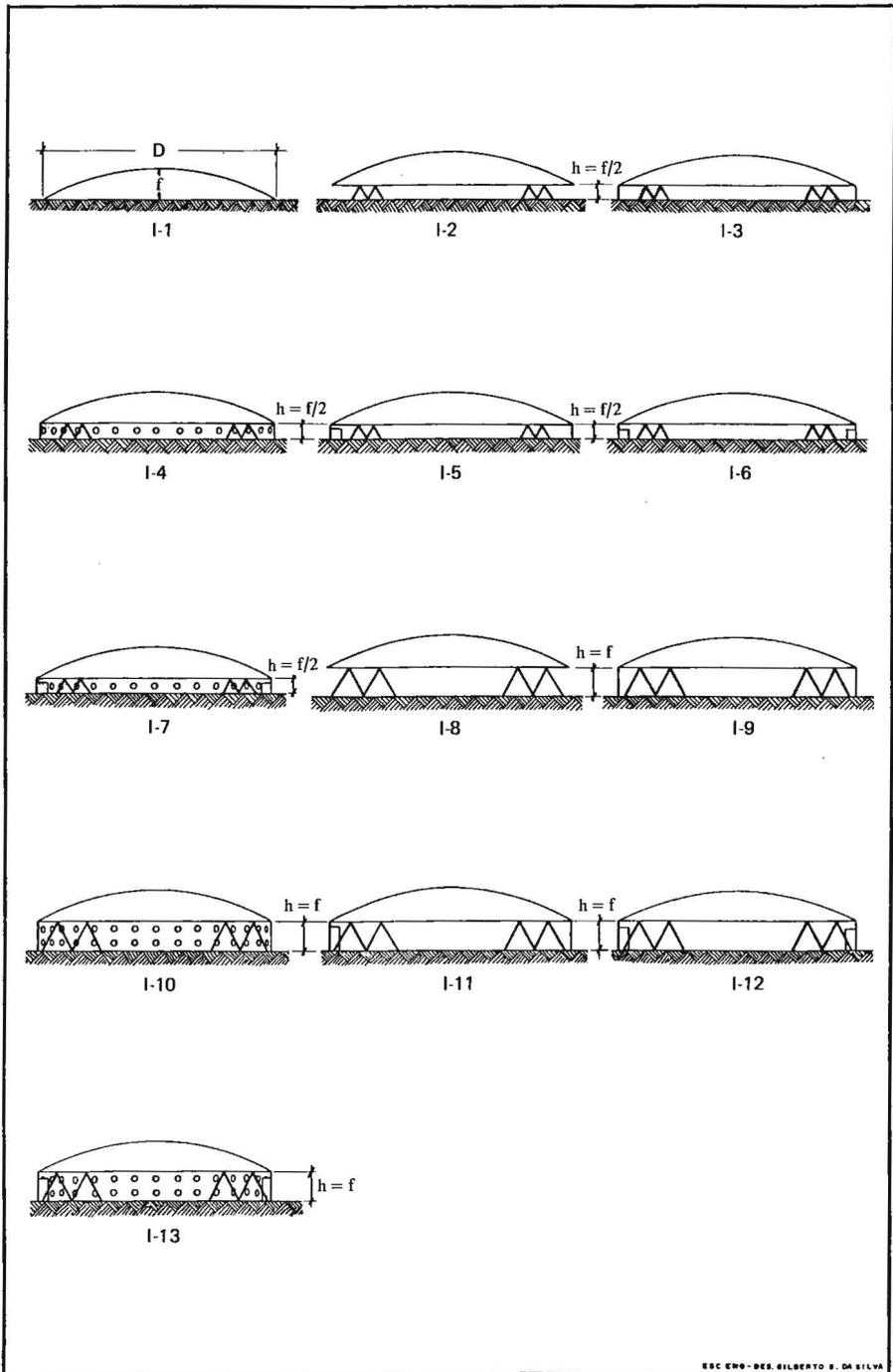
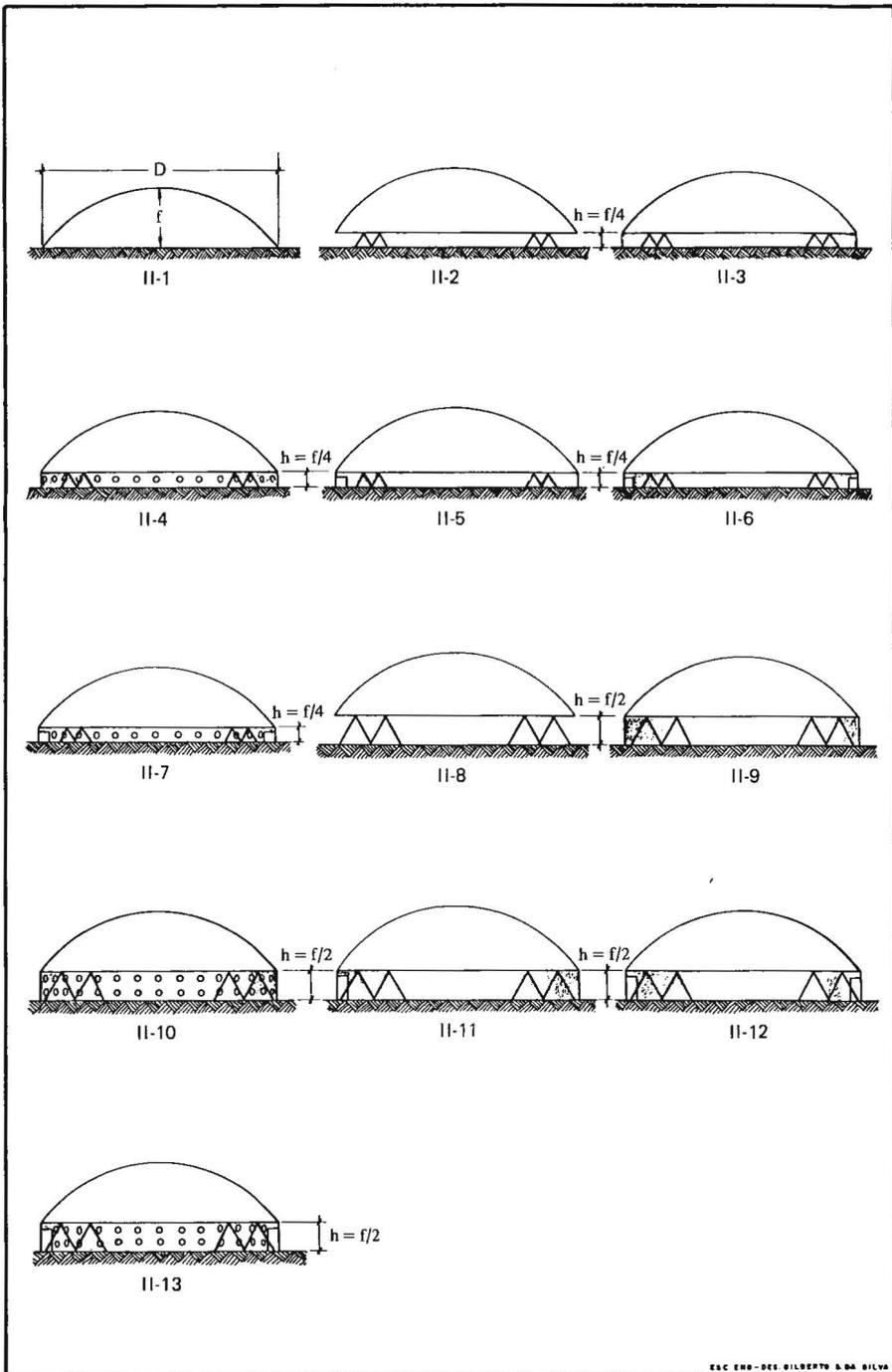
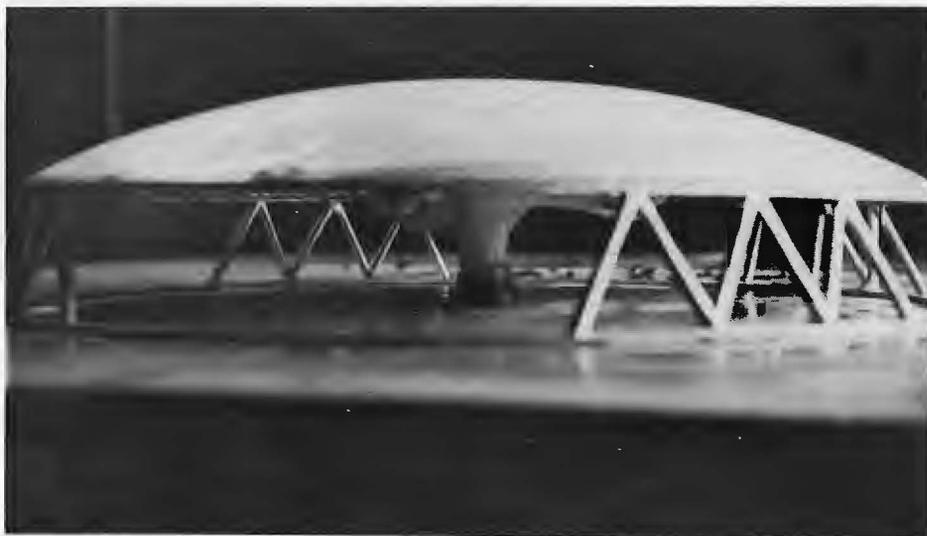


Fig. 11 – Modelos ensaiados. Série I – $f/D = 1/8$



ESC ENG-DEG GILBERTO S. DA SILVA

Fig. 12 – Modelos ensaiados. Série II – $f/D = 1/4$



Modelo I-8



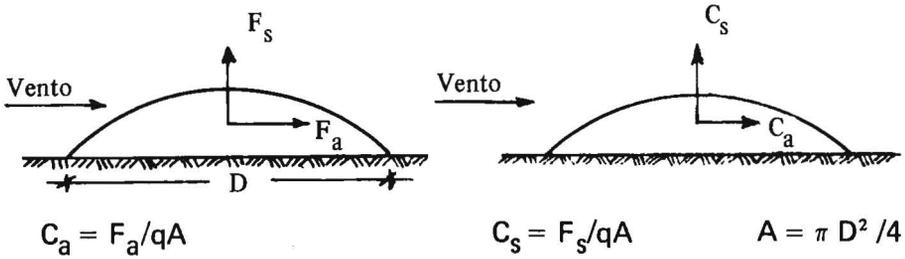
Modelo II-13

Fig. 13

3.2 – *Sustentação e arrasto*

a) Os esforços de sustentação e arrasto, expressos pelos coeficientes de sustentação (C_s) e de arrasto (C_a), aparecem no Quadro 2.

QUADRO 2 – Coeficiente de Sustentação e de Arrasto



Modelo		C _a			C _s
		Parte anterior	Parte posterior	Total	
Série I	I-1 (no solo)	-0	0,004	+0,004	+0,13
	I-2 (pilar baixo)	-0,006	0,018	+0,012	+0,21
	I-3 (parede baixa)	-0,024	0,021	- 0,003	+0,29
	I-8 (pilar alto)	-0,007	0,020	+0,013	+0,22
	I-9 (parede alta)	-0,035	0,028	- 0,007	+0,37
Série II	II-1 (no solo)	-0	0,043	+0,043	+0,27
	II-2 (pilar baixo)	-0,003	0,048	+0,045	+0,29
	II-3 (parede baixa)	-0,024	0,049	+0,025	+0,33
	II-8 (pilar alto)	-0,001	0,055	+0,054	+0,31
	II-9 (parede alta)	-0,042	0,059	+0,017	+0,37

Destacamos os seguintes pontos:

b) Sustentação

A cúpula rebaixada é mais sensível às condições de apoio. C_s variou de 0,13 a 0,37, conforme as condições de apoio.

A cúpula rebaixada sobre o solo apresentou a menor sustentação:

C_s = 0,13.

A sustentação cresce ao se passar da cúpula sobre o solo para cúpula sobre pilares e cresce mais ainda na cúpula sobre paredes.

Na cúpula alteada a variação de sustentação é bem menor: de 0,27 a 0,37.

A sustentação foi independente da flecha relativa nas cúpulas sobre parede alta: C_s = + 0,37 em ambas. Suponhamos uma cúpula em que a velocidade característica seja 130km/h:

$$q = 82\text{kgf/m}^2 ; F = C_s \cdot q \cdot A = 82 \cdot 0,37 \cdot 1 = 30\text{kgf/m}^2 .$$

Esta é a força ascensional por metro quadrado de projeção da cúpula (área da planta). Não está considerada a pressão interna.

c) Arrasto

O arrasto é negativo em dois dos modelos ensaiados com cúpula rebaixada. Isto é, a força horizontal é de sentido contrário ao do vento!

O arrasto na cúpula alteada é muito maior que na rebaixada.

O arrasto diminui muito quando se substituem os pilares por paredes. Isto aconteceu em todos os casos: cúpula rebaixada ou alteada; parede baixa ou alta. No caso da cúpula rebaixada torna-se mesmo negativo, conforme já salientamos.

3.3 – *Perfis de pressão*

Alguns dos perfis obtidos, em plano vertical paralelo à direção do vento, aparecem nas Figs. 14 a 16. Observe-se que:

- aparecem sobrepressões e sotavento no modelo I-1 (Fig. 14);
- as sucções na série I são aproximadamente simétricas em relação ao eixo vertical do perfil (Figs. 14 e 15);
- na série II (Fig. 16) as sucções são muito assimétricas, com valores maiores na parte de barlavento.

3.4 – *Pressão interna*

Em um mesmo modelo as pressões internas chegaram a variar de sucções a sobrepressões. No modelo I-2, variaram de $-0,31$ a $+0,29$; modelo I-8, com valores entre $-0,25$ e $+0,43$. Estes dois modelos são sobre pilares, cúpula rebaixada.

Nos modelos correspondentes de cúpula alteada as variações foram de $-0,21$ a $+0,27$ (pilar baixo) e de $-0,30$ a $+0,16$ (pilar alto). Como regra geral, as sobrepressões nas cúpulas alteadas foram bem menores que nas rebaixadas.

Nos modelos com paredes e dois portões diametralmente opostos e mais ou menos alinhados na direção do vento, mediram-se sobrepressões internas de até $+0,25$ (efeito Venturi invertido).

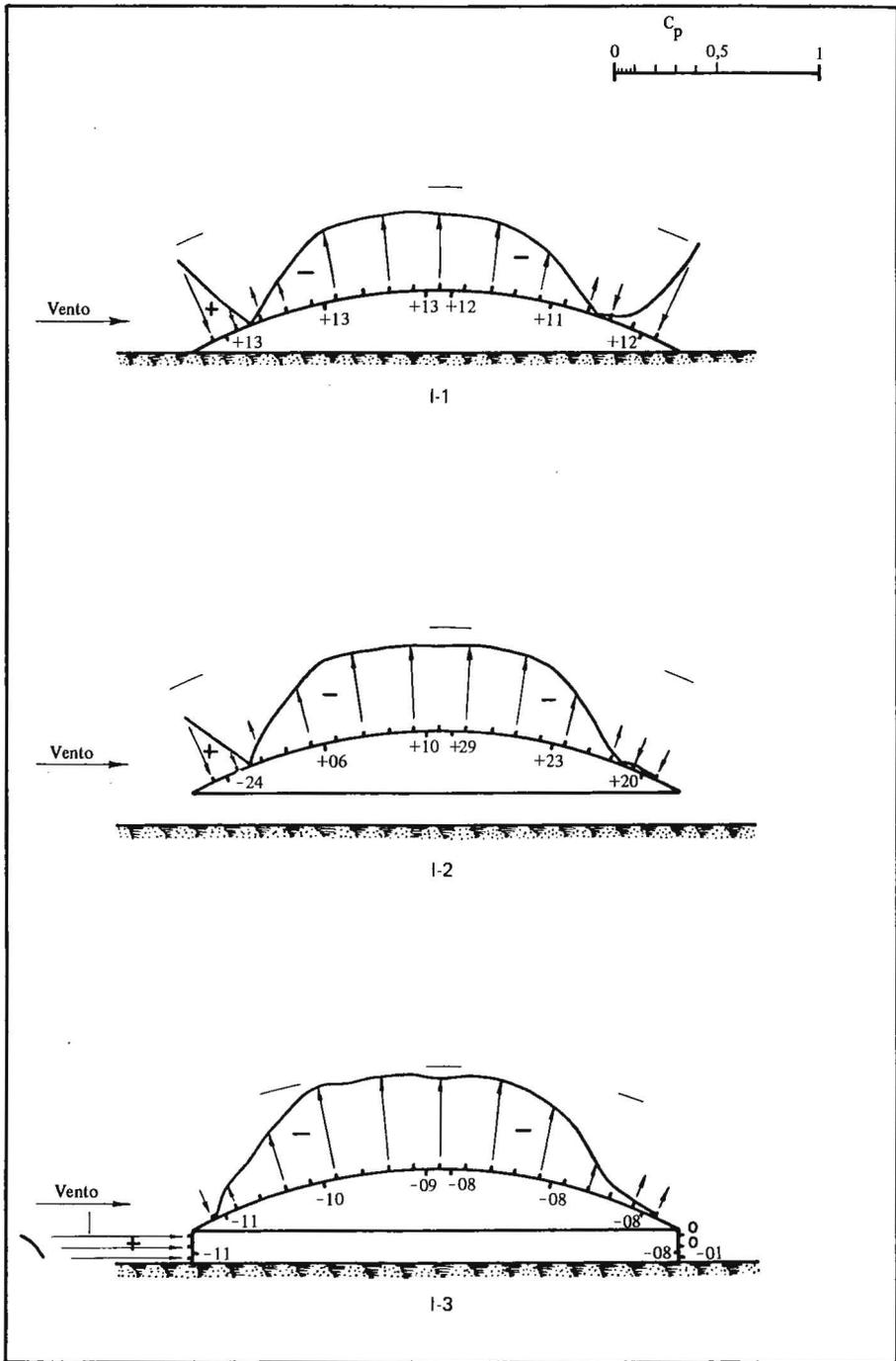


Fig. 14 – Perfis de pressão

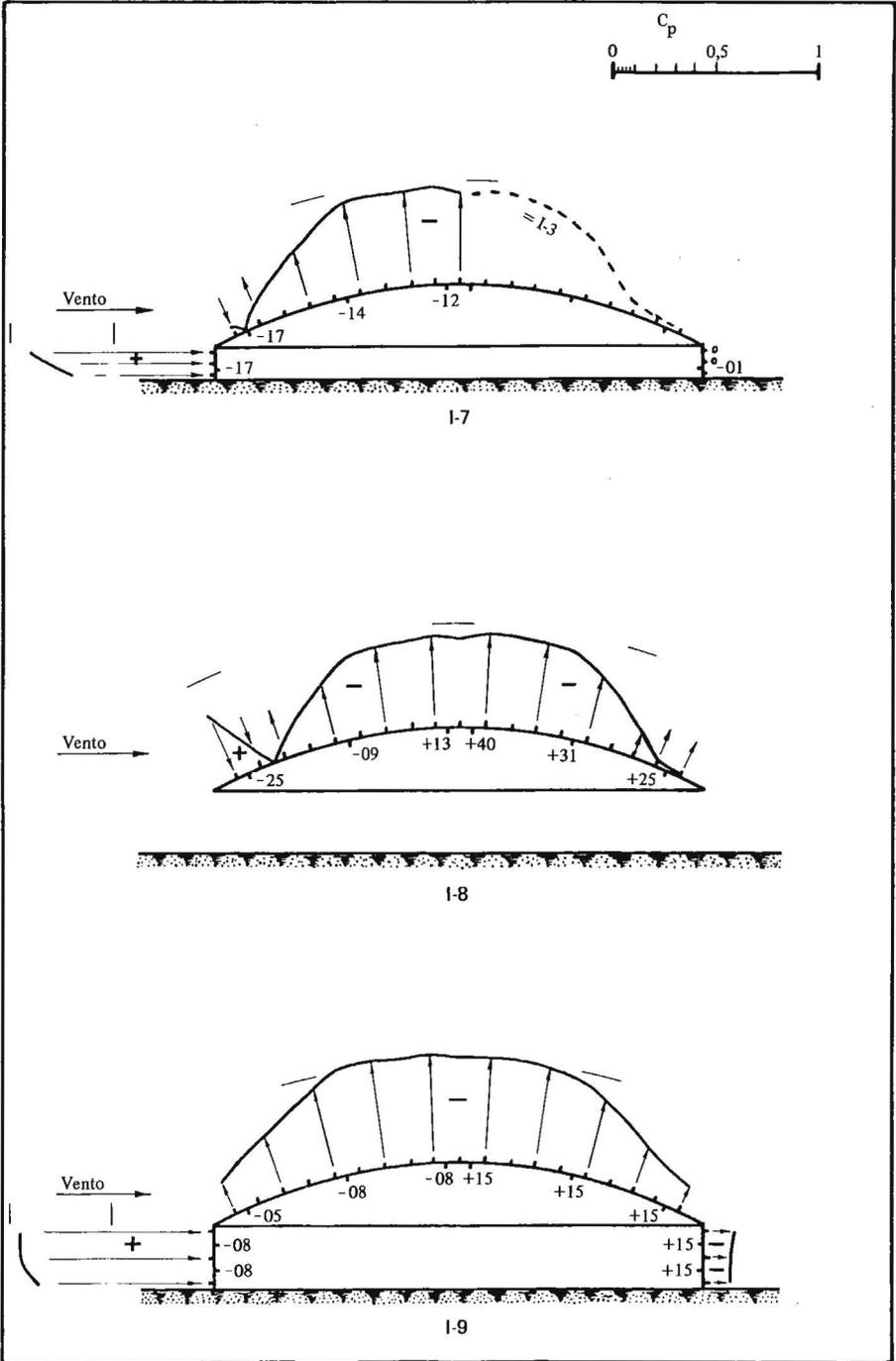


Fig. 15 – Perfis de pressão

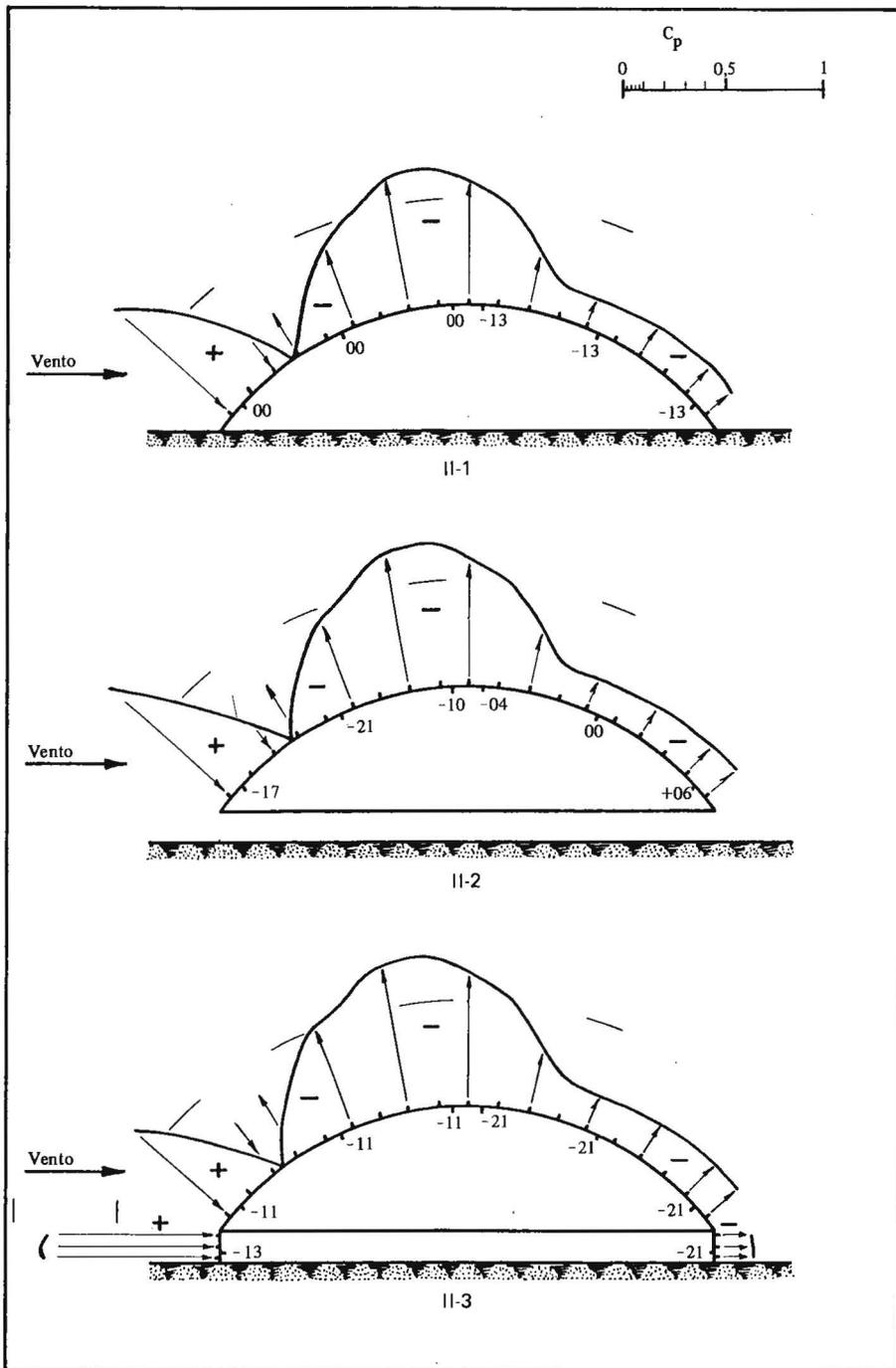


Fig. 16 – Perfis de pressão

Uma forte sobrepressão interna foi obtida na cúpula rebaixada sobre pilares altos: + 0,43 na tomada 12 (a meia distância entre borda e vértice da cúpula), a 105° do ponto de estagnação. Nesta mesma zona, externamente foi atingida uma sucção de -0,42. Ou seja, um coeficiente de pressão $c_p = 0,85$.

Valores bêm superiores foram obtidos nas cúpulas sobre paredes com um portão, situando-se este bêm a barlavento. Mediram-se c_{pi} de + 0,50 (modelo I-5 → parede baixa, cúpula rebaixada); +0,76 (modelo I-11 → parede alta, cúpula rebaixada); + 0,57 (modelo II-5 → parede baixa, cúpula alteada); e o maior deles: + 0,79 (modelo II-11 → parede alteada).

3.5 – Valores locais máximos

a) Foram os seguintes os maiores valores locais:

Modelo I-11: exterior → $c_{pe} = - 0,50$
interior → $c_{pi} = + 0,76$

Total $c_p = - 1,26$.

Para um vento de 130km/h: $F = 103\text{kgf/m}^2$.

Modelo II-11: exterior → $c_{pe} = - 0,63$
interior → $c_{pi} = + 0,79$

Total $c_p = - 1,42$

Para um vento de 130km/h: $F = 116\text{kgf/m}^2$.

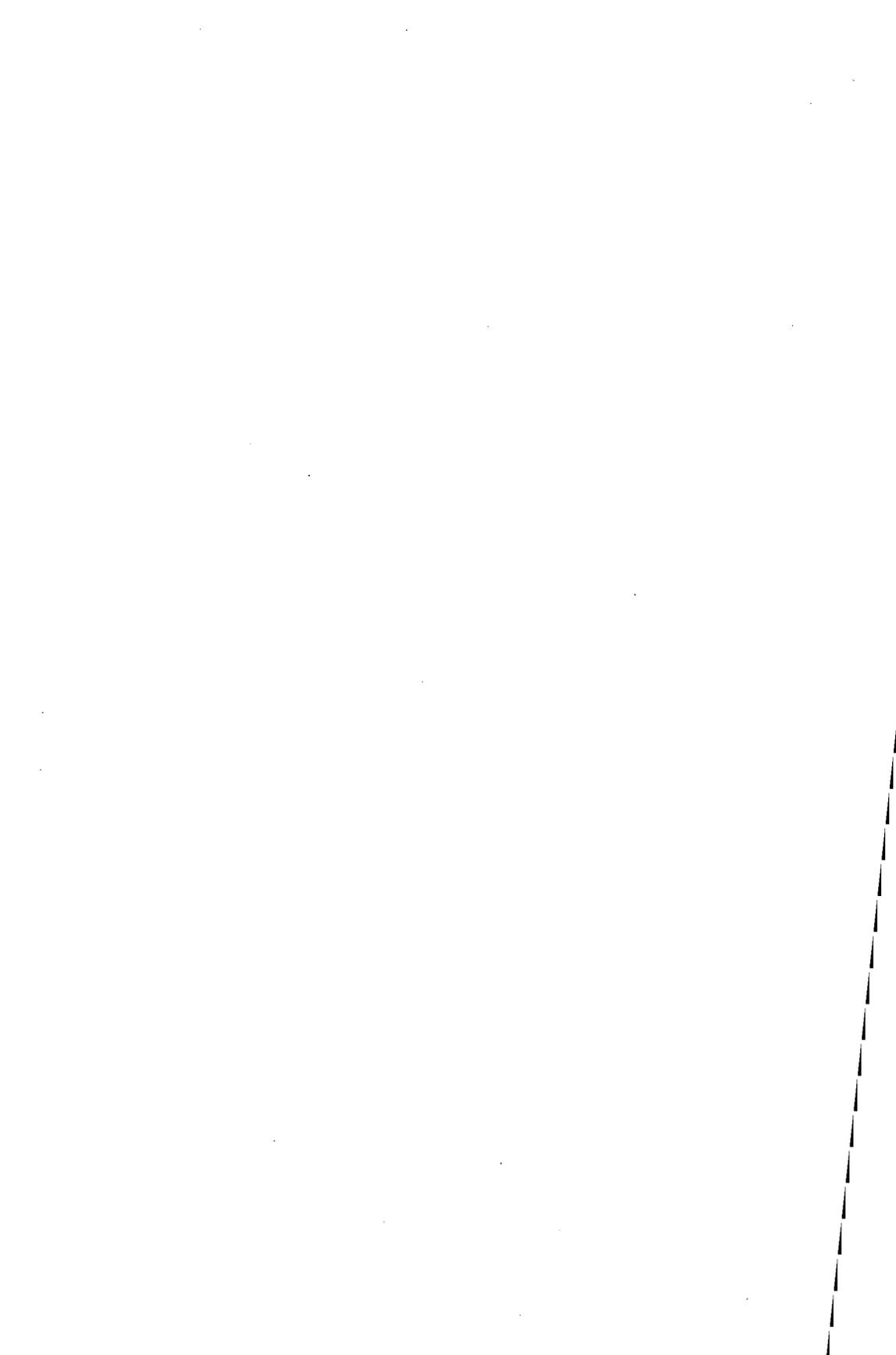
Estes altos valores locais devem ser levados em conta no dimensionamento e ancoragem dos painéis de revestimento das cúpulas, bêm como das estruturas que os sustêm.

b) Salientamos que a distribuição das pressões depende muito das características do vento, conforme mostraram ensaios posteriores, com diversos perfis de velocidade média e distintas características de turbulência.^{4,5,6}

Os ensaios em modelos de cúpulas foram realizados com a colaboração de:

- Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq).
- Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento (IPD) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), São José dos Campos, SP.

– *Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.*



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NB-5: Cargas Acidentais em Edifícios*. Rio de Janeiro, 1961.
- 2 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NB-599: Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1978.
- 3 – BAILEY, A.; VINCENT, N. D. G. Wind pressure on buildings including effects of adjacent buildings. *Journal ICE*, London, Paper 5367. October 1943.
- 4 – BLESSMANN, J. Estudo Aerodinâmico da Cúpula do Hotel Tropical de Manaus. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 14., Buenos Aires, 1970. *Anais*, Buenos Aires, 1970, v.II, p.273-304.
- 5 – ———. Influência do Perfil do Vento e do Número de Reynolds nas Pressões Estáticas em Modelos de Cúpulas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 15., Porto Alegre, 1971. *Anais*, Porto Alegre, 1971, v.1, p.377-411.
- 6 – ———. Pressures on domes with several wind profiles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Tokyo, 1971. *Proceedings*. Tokyo, 1971. p.317-326.
- 7 – ———. *Pressão Interna*. P. Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975.
- 8 – BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. Interação em Edifícios Altos Vizinhos Submetidos à Ação do Vento. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 19., Santiago do Chile, 1978. *Anais*, Santiago, 1978.
- 9 – BLESSMANN, J. Efeitos do Vento em Construções Civas. In: *Manual do Engenheiro Globo*. v.7, Tomo 1, p.285-373.
- 10 – CHIEN, N.; FENG, Y.; WANG, H.; SIAO, T. *Wind-tunnel studies of distribution on elementary building forms*. Iowa, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1951.
- 11 – COLIN, P. E.; D'HAVÉ, R. Exécution en tunnel aérodynamique d'essais sur maquettes de bâtiments en rapport avec les mesures faites sur constructions réelles. In: CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, Teddington, 1963. *Proceedings*. London, 1965. v.1, p.255-281.
- 12 – COMMISSION DES RÈGLES NEIGE ET VENT, Paris. *Règles Définissant les Effets de la Neige et du Vent sur les Constructions*; Document Technique Unifié; Règles N. V. 65. Paris, Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, 1967.
- 13 – DAVENPORT, A. G. *Wind loads on structures*. Ottawa, National Research Council of Canada, 1960. (Technical Paper of the Division of Building Research, 88).
- 14 – D'HAVÉ, R. L'action du vent sur les bâtiments. Bruxelles, A.B.E.M., 1965. 11p. (Publication 321).
- 15 – DRYDEN, H. L.; HILL, G. C. Wind pressures on structures. *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, Washington, D. C., v.20, p.697-732. 1924-26.

- 16 – 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.
- 17 – HARRIS, C. L. Influence of neighboring structures on the wind pressure on tall buildings. *Bureau of Standards Journal of Research*. v.12, Jan. 1934. (Research Paper RP 637).
- 18 – IRMINGER, J. O.; NØKKENTVED, C. *Wind-pressure on buildings*. Experimental researches, second series. Copenhagen, Dinamarca, Naturvidenskabelige Samfund, 1936.
- 19 – PRIS, M. R. Études aérodynamiques VII: détermination des pressions dues à l'action du vent sur les toitures des bâtiments rectangulaires en plan en contact avec le sol. Détermination des pressions sur les toitures sphériques. Bâtiments éloignés du sol. Influence de l'éloignement sur les caractéristiques aérodynamiques des bâtiments rectangulaires en plan. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*. Paris, 1963.
- 20 – SCHWEIZERISCHER INGENIEUR – UND ARCHITEKTEN – VEREIN, Zürich. *Normes Techniques n.160: Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten*. Zürich, 1970. 36p.
- 21 – WHITBREAD, R. 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, Aerodynamic Division, 1963. (NPL Aero Report 1077).

**Composto na Editora da URGs e
impresso na Livraria e Editora Pallotti em
agosto de 1978**

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** – Intervalo de tempo; mudança de intervalo de tempo; conclusões e recomendações.
- 4 – **Considerações Sobre Alguns Tópicos Para Uma Norma de Vento** – Ações locais; inclinação do telhado; forma e proporções da construção; interação e proteção; resumo.
- 5 – **Pressão Interna** – 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 Jacinto Gomes, 540, 5ª andar
90.000 – Porto Alegre – RS