

J. Blessmann

Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL/1



edições urgs

S Efe
E22

**Efeitos do Vento
em Edifícios e Cúpulas**

RESERVA TÉCNICA
Editora da UFRGS

Nº do registro: 3849

Nº da lista: 1165

Data: 11/08/2010

Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas

Joaquim Blesemann

- Engenheiro Civil
- Mestre em Ciências Pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
- Professor Adjunto da Escola de Engenharia da UFRGS
- Pesquisador-Conferencista do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq)

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Série Engenharia Estrutural



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Prof. Dr. EDUARDO Z. FARACO, Reitor

Prof. Dr. IVO WOLFF, Vice-Reitor

COMISSÃO CENTRAL DE PUBLICAÇÕES

JORGE ALBERTO FURTADO, Presidente

BLASIO H. HICKMANN, Secretário Executivo

ANA IRIS DO AMARAL

FLÁVIO LOUREIRO CHAVES

JUDITH LANG PINHEIRO ALVES

JUSSARA PANSARDI DA CUNHA

LOTHAR FRANCISCO HESSEL

APRESENTAÇÃO

O Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul inicia, com a presente publicação, a *Série Engenharia Estrutural das edições URGs*.

É significativo que o seja através do trabalho especializado *do Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas*, de autoria do eminente Professor Joaquim Blessmann, pesquisador-conferencista do Conselho Nacional de Pesquisas e professor do curso de Pós-Graduação em "Mecânica dos Sólidos e Estruturas", em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil. O renome internacional alcançado pelo Professor Blessmann no campo de sua especialidade assegura, desde já, a qualidade e interesse da publicação.

O presente trabalho consubstancia os resultados teóricos e experimentais alcançados após longas pesquisas e vem preencher uma séria lacuna sentida por todos quantos se dedicam ao cálculo estrutural. Espera, por isso, o DEC que a série iniciada, em particular esta publicação, alcance os objetivos propostos.

A Comissão Central de Publicações da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo estímulo e suporte material emprestados à presente publicação, torna-se meritariamente credora dos agradecimentos da engenharia nacional.

D. E. C.

1 - NOÇÕES DE AERODINÂMICA

1.1 - INTRODUÇÃO

a) O problema do vento em construções pode ser encarado sob 3 aspectos: meteorológico, aerodinâmico e estrutural.

Neste trabalho 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 " $\rho g z$ " é desprezável por ser pequeno em presença dos demais termos. Este teorema vale para escoamentos incompressíveis. Se for irrotacional, pode-se aplicar entre 2 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 \tilde{a} sua soma constante (p_t):

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

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 velocidades da ordem de 300 km/h, " ρ " será constante em todo o campo aerodinâmico. Colocando-se um sólido neste campo, \tilde{e} sofrerá modificações, sendo que as linhas de corrente se deformarão para contornar o obstáculo. Poderemos ter uma ou mais linhas de corrente incidindo normalmente \tilde{a} superfície do sólido. Neste caso a velocidade se anula ($u_e = 0$) e a pressão \tilde{e} t \tilde{o} da ela estática: \tilde{e} a chamada pressão de estagnação, " p_e ", que surge em um ponto de estagnação.

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

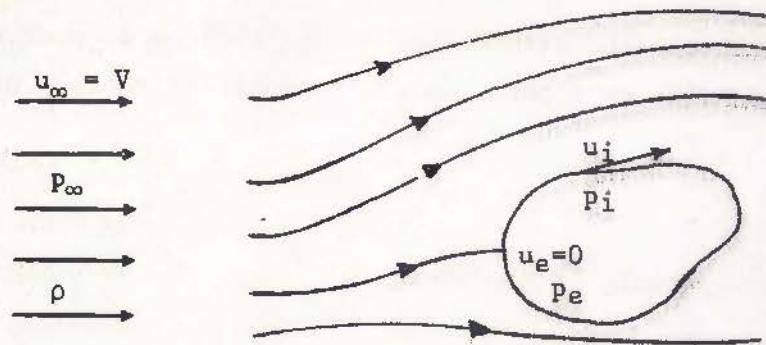


FIG. 1

$$1/2 \cdot \rho V^2 + p_\infty = 0 + p_e$$

ou

$$\boxed{p_e - p_\infty = q = 1/2 \cdot \rho V^2} \quad (3)$$

" $p_e - p_\infty$ " \tilde{e} a pressão efetiva em um ponto de estagnação. Ela \tilde{e} denominada pela norma brasileira NB-5 de pressão de obstrução, sendo representada pela letra " q ". \tilde{E} numéricamente igual \tilde{a} pressão dinâmica ao longe.

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

$q = \frac{V^2}{16}$

$q \rightarrow \text{em kgf/m}^2$
 $V \rightarrow \text{em m/s}$

(4)

No Rio Grande do Sul são registrados ventos com velocidade de 130 km/h, a 7 m 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 60 kgf/m² entre 6 e 20 m. Fazendo-se a correção da altura, a pressão de obstrução a 20 m de altura, para vento de 130 km/h a 7 m de altura será de 105 - 110 kgf/m² em campo aberto. Isto é, um valor quase duplo do da NB-5.

É a primeira observação que temos a fazer: o valor dado pela NB-5 é demasiado baixo para algumas zonas do Brasil. Enquanto países menores, como Inglaterra, França, Bélgica, Holanda apresentam 2 ou mesmo 3 valores diferentes, conforme a zona, no Brasil, com seu imenso território, temos apenas 1.

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 (Wind Loads on Structures).

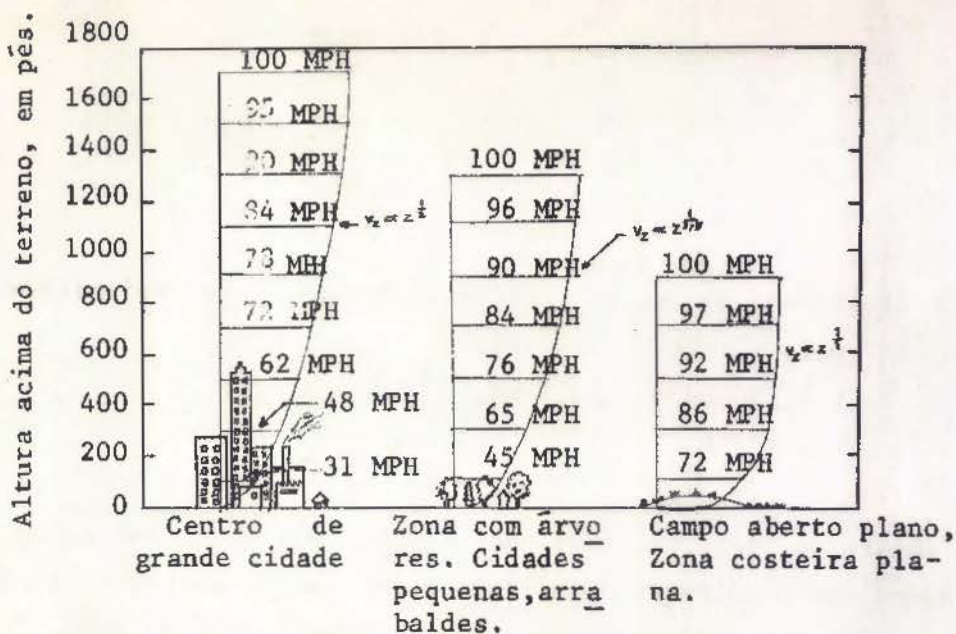


Figura - 2

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 3 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.

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):

$$1/2 \cdot \rho V^2 + p_\infty = 1/2 \cdot \rho u_i^2 + p_i$$

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

$$\Delta p = p_i - p_\infty = 1/2 \cdot \rho (V^2 - u_i^2)$$

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

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:

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

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

- no caso de

$$u_i = V, \quad c_p = 0$$

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 2 limites a pressão é superior à do infinito: temos uma sobrepressão.

- não há um limite superior teórico de u_i :

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

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 alcan-

çar valores muito superiores, numéricamente, 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:

$$c_{pe} = \frac{\Delta P_e}{q} \quad ; \quad c_{pi} = \frac{\Delta P_i}{q}$$

A soma vetorial dos dois fornece " c_p ".

1.4 - COEFICIENTE DE FORMA

a) Aplica-se a uma superfície plana:

$$C = \frac{F}{q S} \quad \begin{array}{l} F \rightarrow \text{fôrça normal sôbre a superfície plana} \\ S \rightarrow \text{área desta superfície} \end{array}$$

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

$$C = \frac{\int_S \Delta p \cdot dS}{q} = \frac{1}{S} \int_S c_p dS \quad (8)$$

Na prática o coeficiente de forma é calculado por integração do coeficiente de pressão, de acôrdo 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 ".

NOTA: a NB-5 usa para o coeficiente de forma o símbolo " c ". Preferimos, para coeficientes integrados, usar letras maiúsculas, reservando as minúsculas para coeficientes locais.

1.5 - COEFICIENTE DE FÔRÇA GLOBAL

a)
$$C_g = \frac{F_g}{q S}$$

F_g → fôrça global: resultante das fôrças do vento sôbre o sôlido.

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

1.6 - COEFICIENTE DE TORÇÃO

a)
$$C_t = \frac{M_t}{q S L}$$

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

S → área de uma superfície de ref.

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, Dryden e Hill verificaram 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, em seus clássicos ensaios sôbre este tema, constataram, entre outras alterações, um aumento das sucções nos telhados e das sobrepressões nas paredes de construções vizinhas.

Ensaio realizado em Iowa 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 2 edifícios vizinhos (modelos em túnel de vento).

Na Bélgica, o estudo de 2 edifícios vizinhos e em fluxo bidimensional (altura infinita) mostrou que a força global em um destes edifícios é diminuída pela presença do outro nas proximidades. Fenômeno idêntico foi por nós observado nos ensaios citados anteriormente.

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 figura 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 figura 3b procura ilustrar este fenômeno com casos comuns de interação.

Não é possível, portanto, aplicar uma fórmula como a dada na NB-5:

$$C_e = 1,2 \operatorname{sen} \alpha - 0,5$$

a qualquer construção.

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.

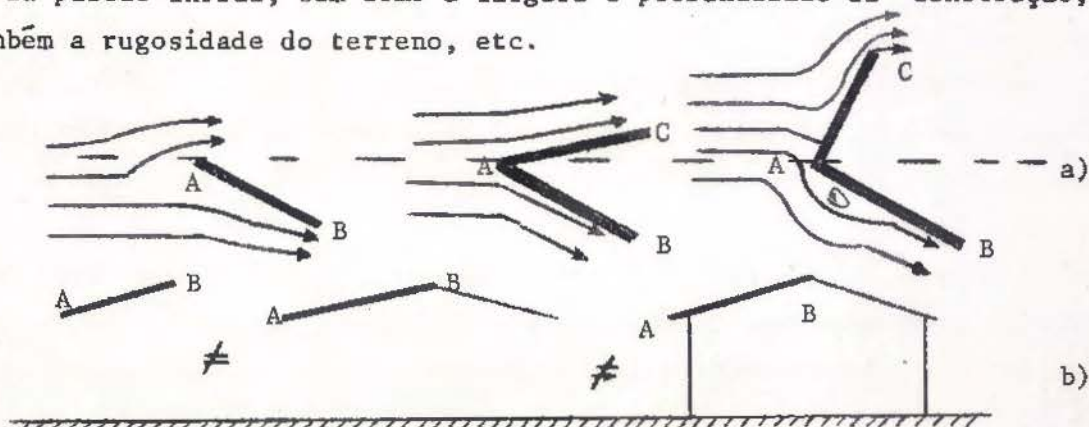


FIG. 3

2 - VENTO EM EDIFÍCIOS

2.1 - INFLUÊNCIA DA ALTURA

a) A norma brasileira 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 (escaloadas, 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

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

sendo "l" a dimensão perpendicular a 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:

E	=	1/2	3	5	10	∞
C _g	=	0,94	1,50	1,55	1,64	2,00

A influência do Alçamento se faz sentir principalmente na parte do edifício situada na esteira. A parede de barlavento é pouco influenciada. Na figura 4 podem ser vistos diversos perfis de pressão tirados dos ensaios realizados em Iowa por Chien, Feng, Wang e Siao (Wind-Tunnel Studies of Pressure Distribution on Elementary Building Forms).

2.2 - INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE

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

Para um Alçamento de 10, encontramos os seguintes valores (Blessmann, "Do Problema do Vento em Edifícios") para o coeficiente de forma externo na parede de sotavento, o vento incidindo normalmente à fachada menor:

Pr	=	1	2,5	5	10
C _e	=	-0,88	-0,53	-0,20	-0,22

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, baseada nos ensaios de Prís, a partir de Pr = 4 toma um valor constante para as sucções a sotavento, dada pela expressão

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

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 figura 5.

2.3 - SUCÇÕES LOCAIS

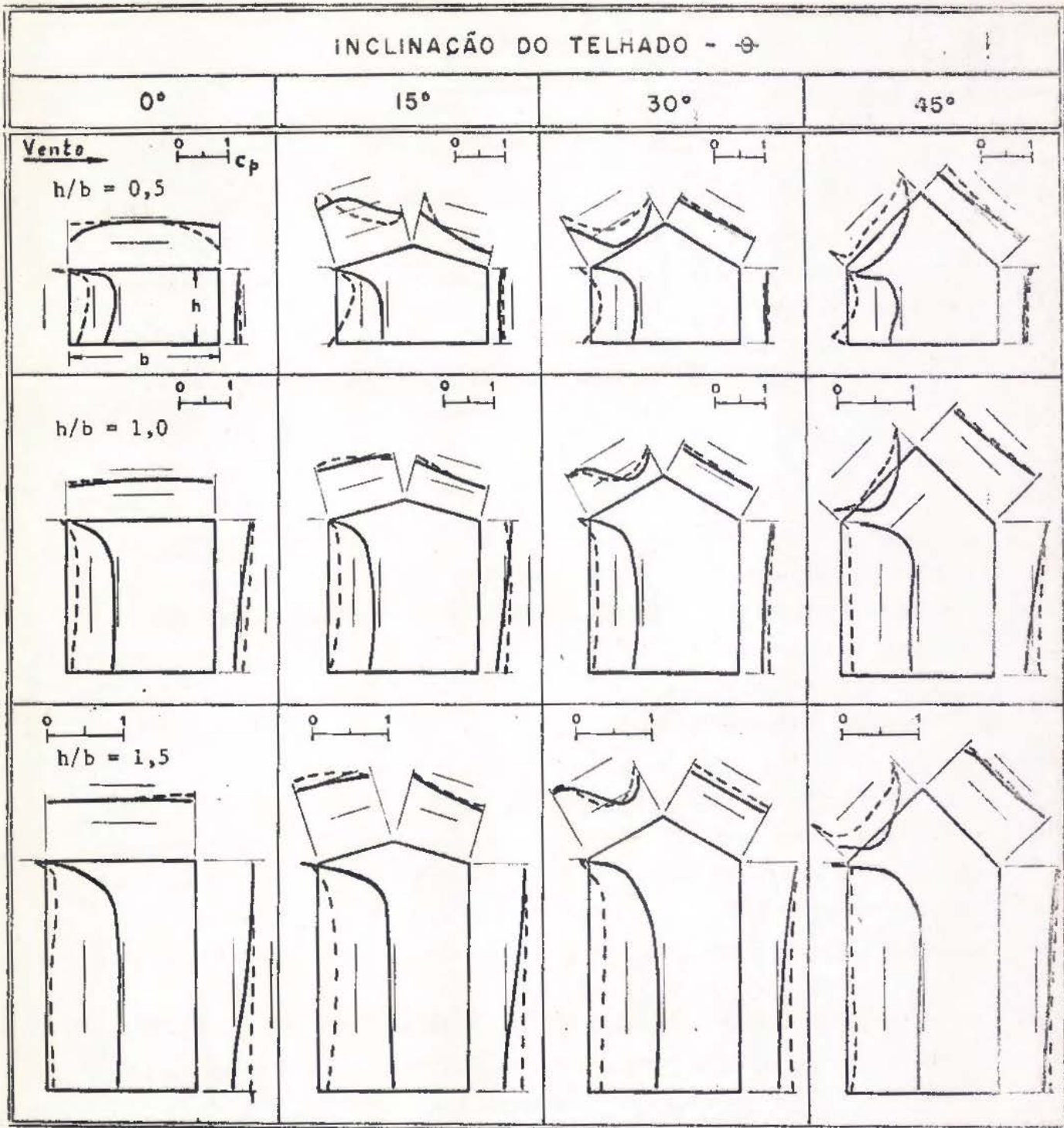
a) Na mesma figura 5 podem-se observar as altas sucções que surgem lateralmente na zona mais de barlavento. Na figura 6 aparece a série de modelos por nós ensaiados em 1963 ("Do Problema do Vento em Edifícios"). Nestes ensaios foram observados valores muito altos de sucções locais e de sucções em certas zonas de alguns modelos, para certas incidências do vento.

Na figura 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 chegaram a $-1,2$. Repare-se também na forte assimetria de esforços nestes 2 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 figura 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 ve



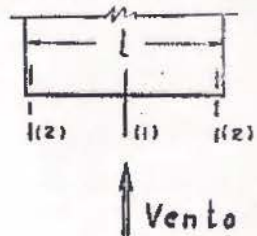
Secção média: ——— (1)

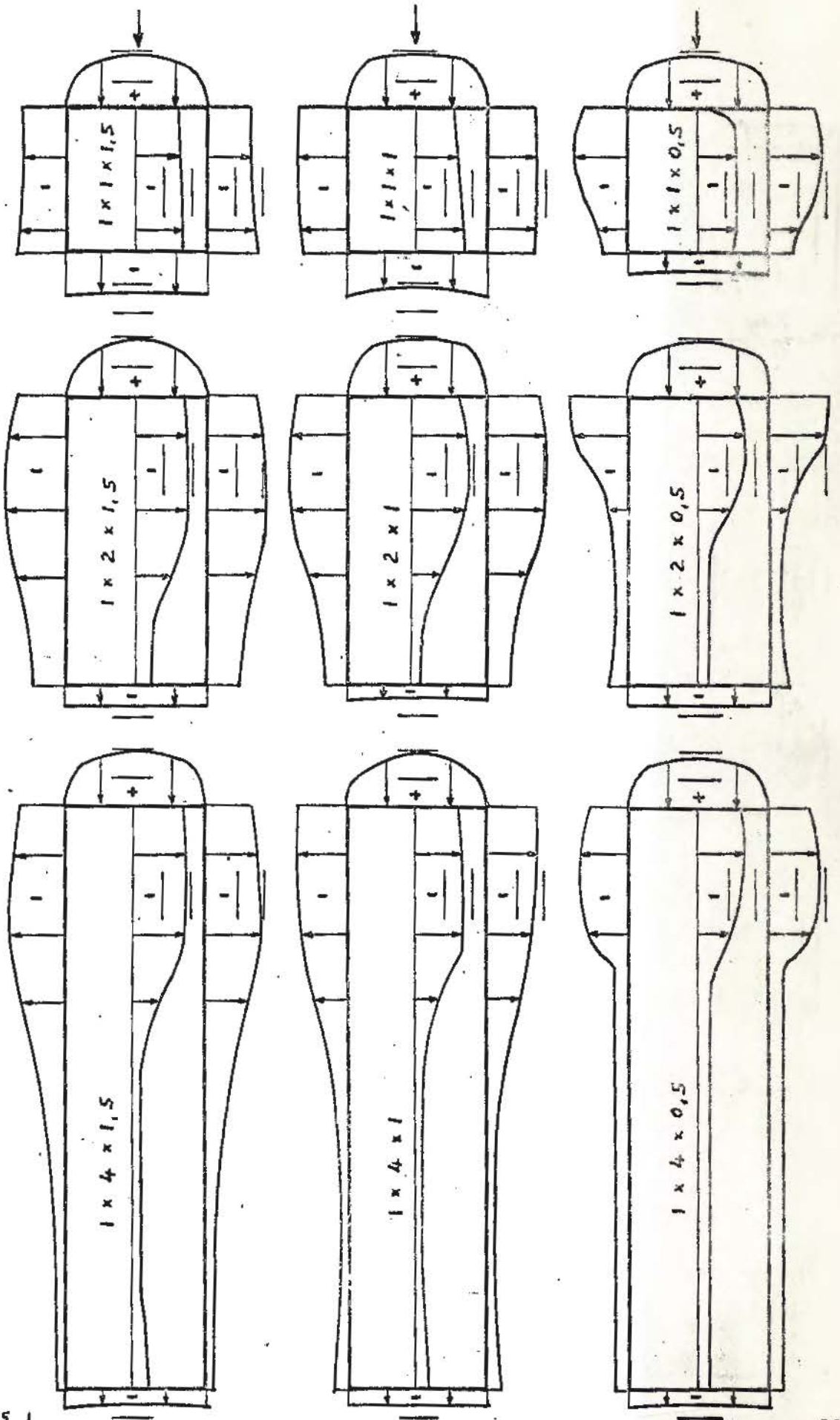
Secções próximas às bordas: - - - - (2)

Fig. 4

Pressões em modelos de construções. Vento a 90°

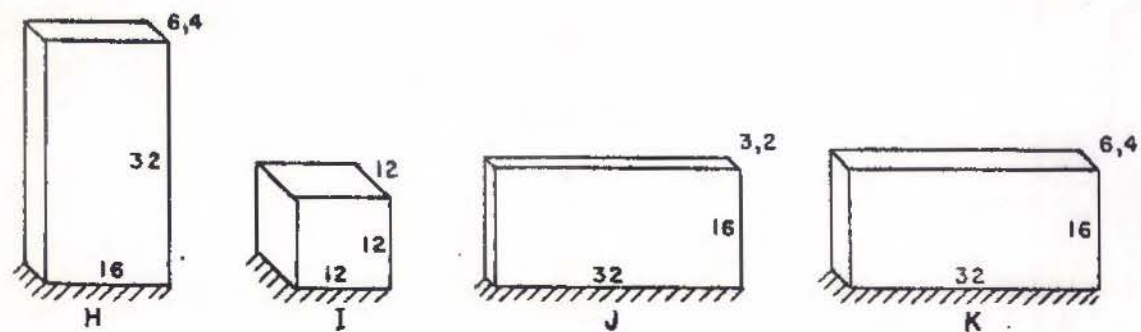
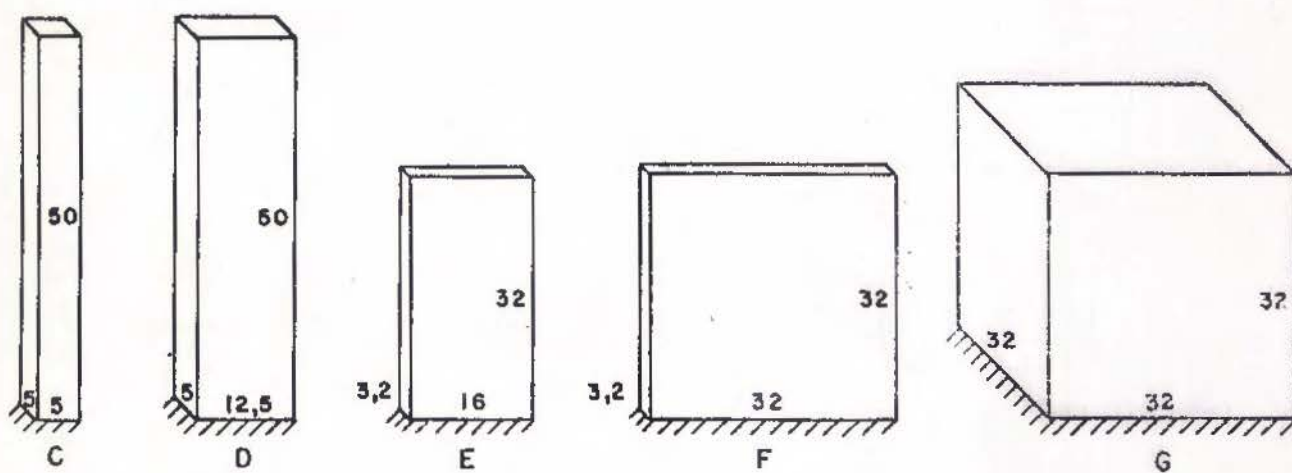
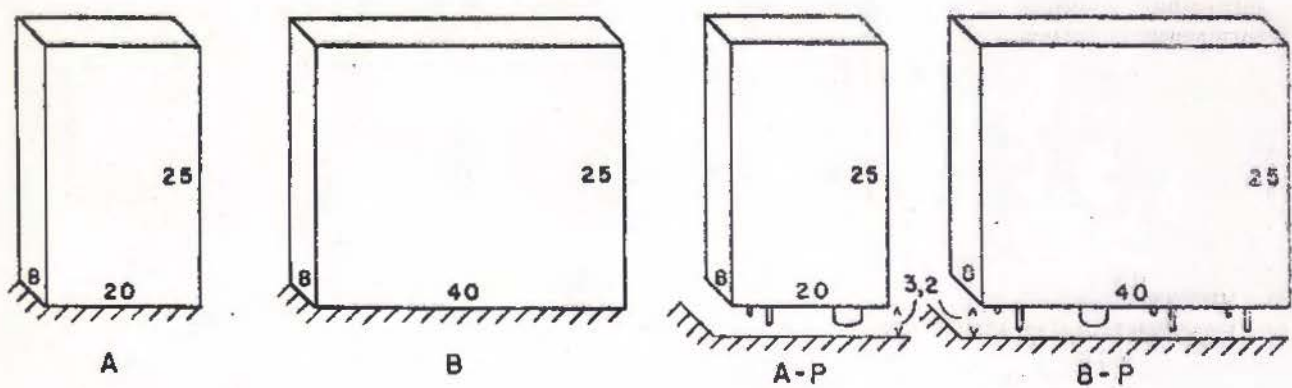
Relação $h/b = 1$



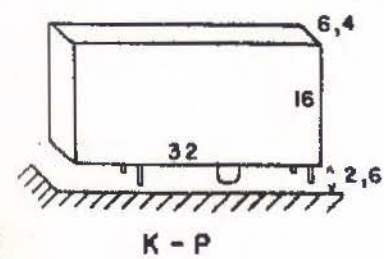


0,5
Cp

Fig. 5 - PERFIS DE PRESSÃO.



Dimensões nominais em cm



dação e da estrutura secundária correspondente, por exemplo).

c) Picos localizados de pressão ainda maiores são constatados na face superior, causados pelos vórtices de tópo. Em nossos ensaios acima mencionados medimos $c_{pe} = -3,60$ na parte dianteira do tópo do modelo H, vento incidindo a 45^0 . Aplicando-se este coeficiente a um edifício de 60 m de altura (NB-5: $q = 100 \text{ kg/m}^2$), concluímos que a força de sucção atinge 360 kgf/m^2 .

Nos ensaios de Iowa, 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 15^0 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 15^0). Resultou também uma componente do esforço horizontal contra o sentido do vento (Vide fig. 9). Note-se também os fortes valores de torção, proveniente desta assimetria de sobrepressões e depressões. Na figura 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:

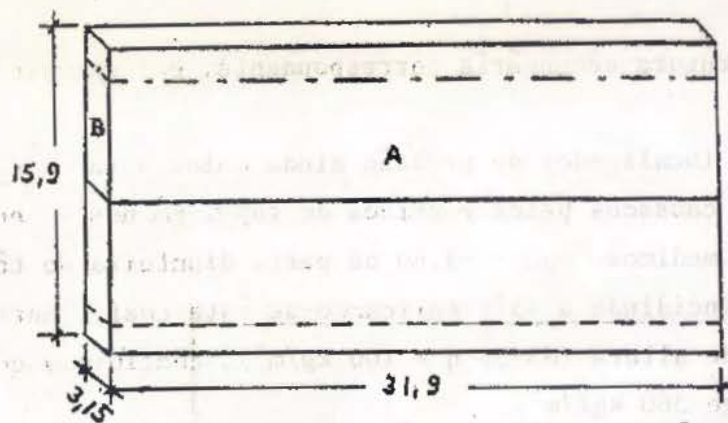
$$c_m \rightarrow \text{coefic. de torção por unidade de altura} \rightarrow = \frac{m_t}{q l^2}$$

m_t → momento de torção por unidade de altura
} → dimensão longitudinal do modelo (eixo maior da base)

c_n → coeficiente de força normal por unidade de altura →

$$\rightarrow c_n = \frac{f_n}{q l}$$

f_n → componente da força horizontal do vento, normal à \vec{a} , por unidade de altura.



Localização das Secções

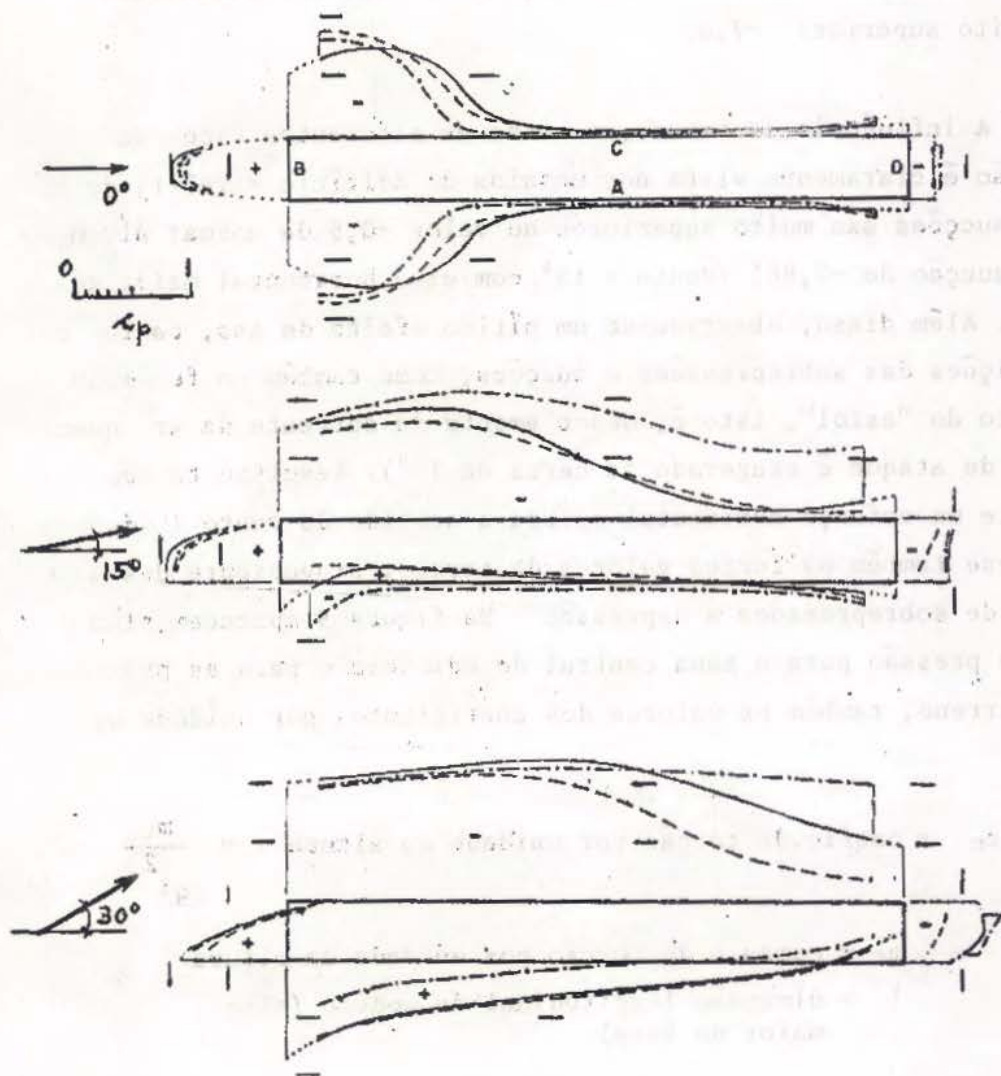
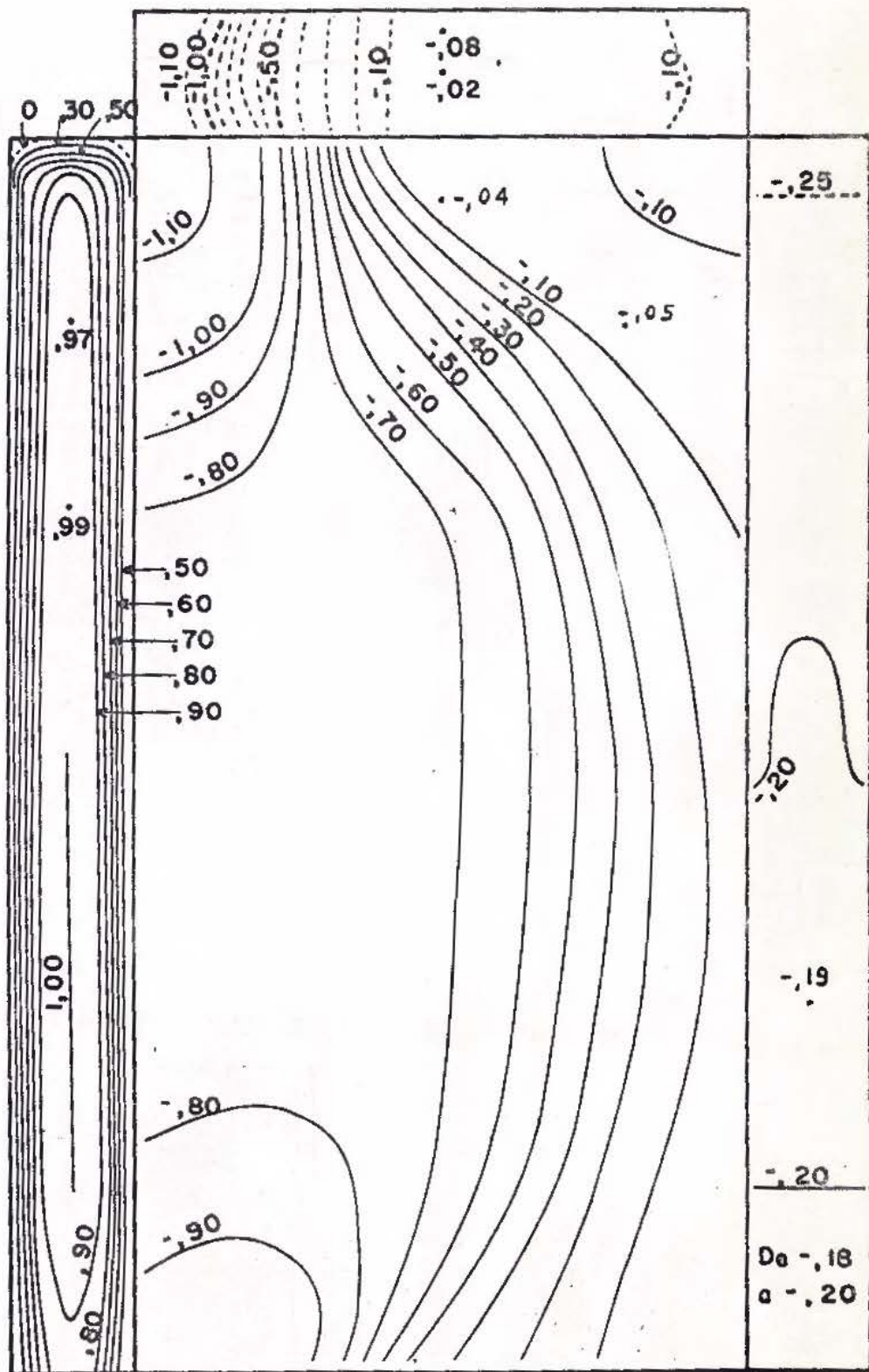


Fig. 7 - PERFIS HORIZONTAIS DE PRESSÃO



MODÉLO E

Fig. 3

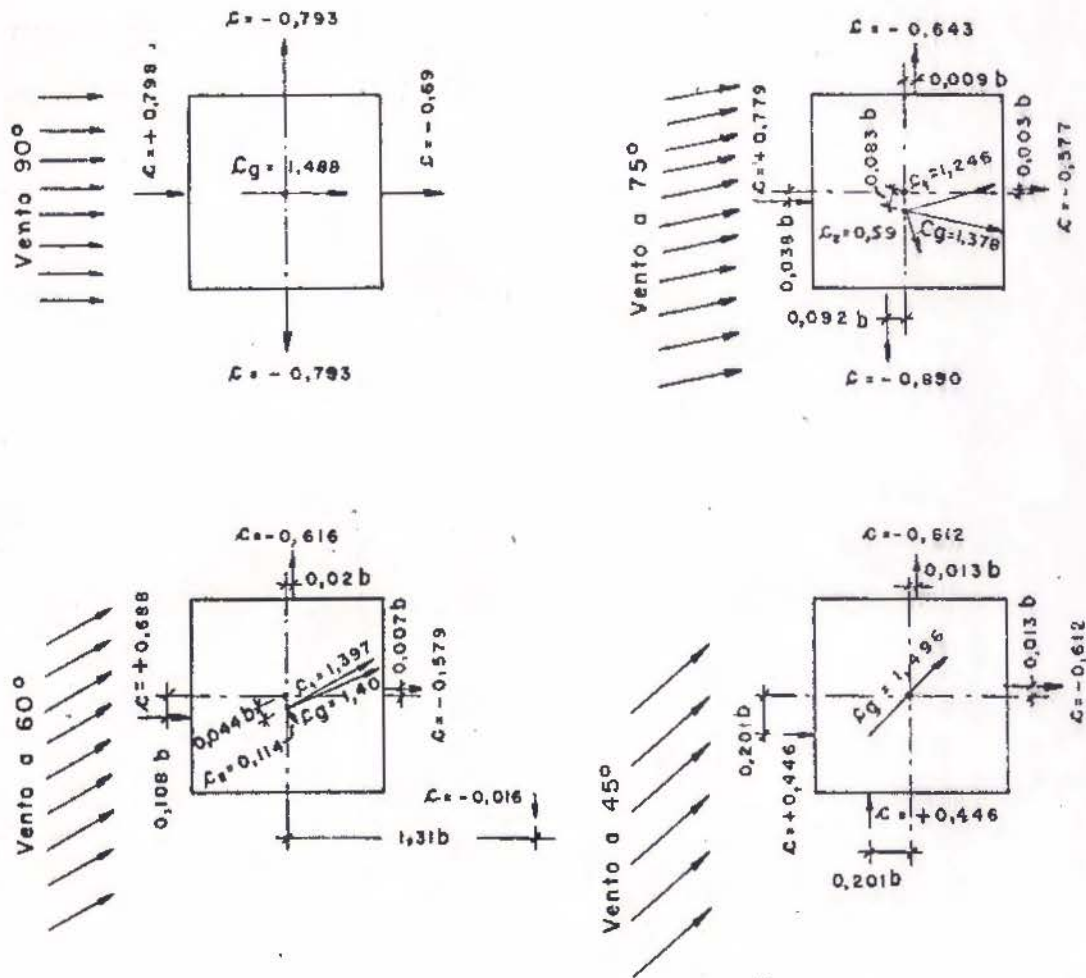


Fig.10 - Valores de C , C_g e excentricidades.

Prisma $1 \times 1 \times 3$ montado em plataforma.

c_t → coeficiente de força tangencial por unidade de altura

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

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

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

$$\begin{aligned} C_m &= M_t / q S \\ C_n &= F_n / q S \\ C_t &= F_t / q S \end{aligned}$$

Os valores obtidos foram:

Para o estol:

$$\begin{aligned} C_n &= 0,650 \\ C_t &= 0,015 \\ C_m &= 0,142 \end{aligned}$$

Para vento frontal (perpendicular à fachada maior):

$$\begin{aligned} C_n &= 0,94 \\ C_t &= 0 \\ C_m &= 0 \end{aligned}$$

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 ($1,2 \sin \alpha$ -0,5 ou $1,6 \sin \alpha$ -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, obrigatoriamente, ser ensaiadas em túnel aerodinâmico.

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

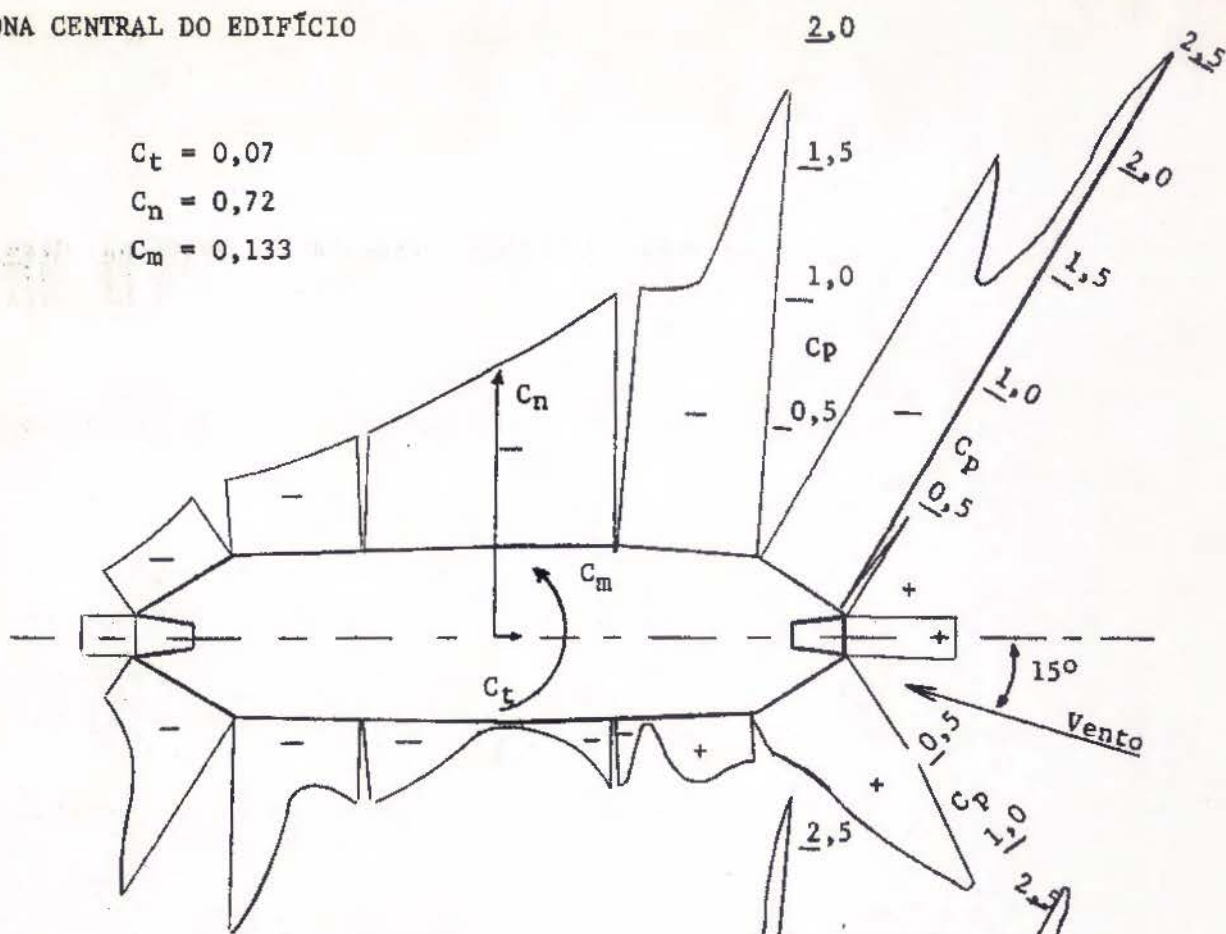
g) Forças contra o sentido do vento apareceram também em outros

ZONA CENTRAL DO EDIFÍCIO

$$C_t = 0,07$$

$$C_n = 0,72$$

$$C_m = 0,133$$

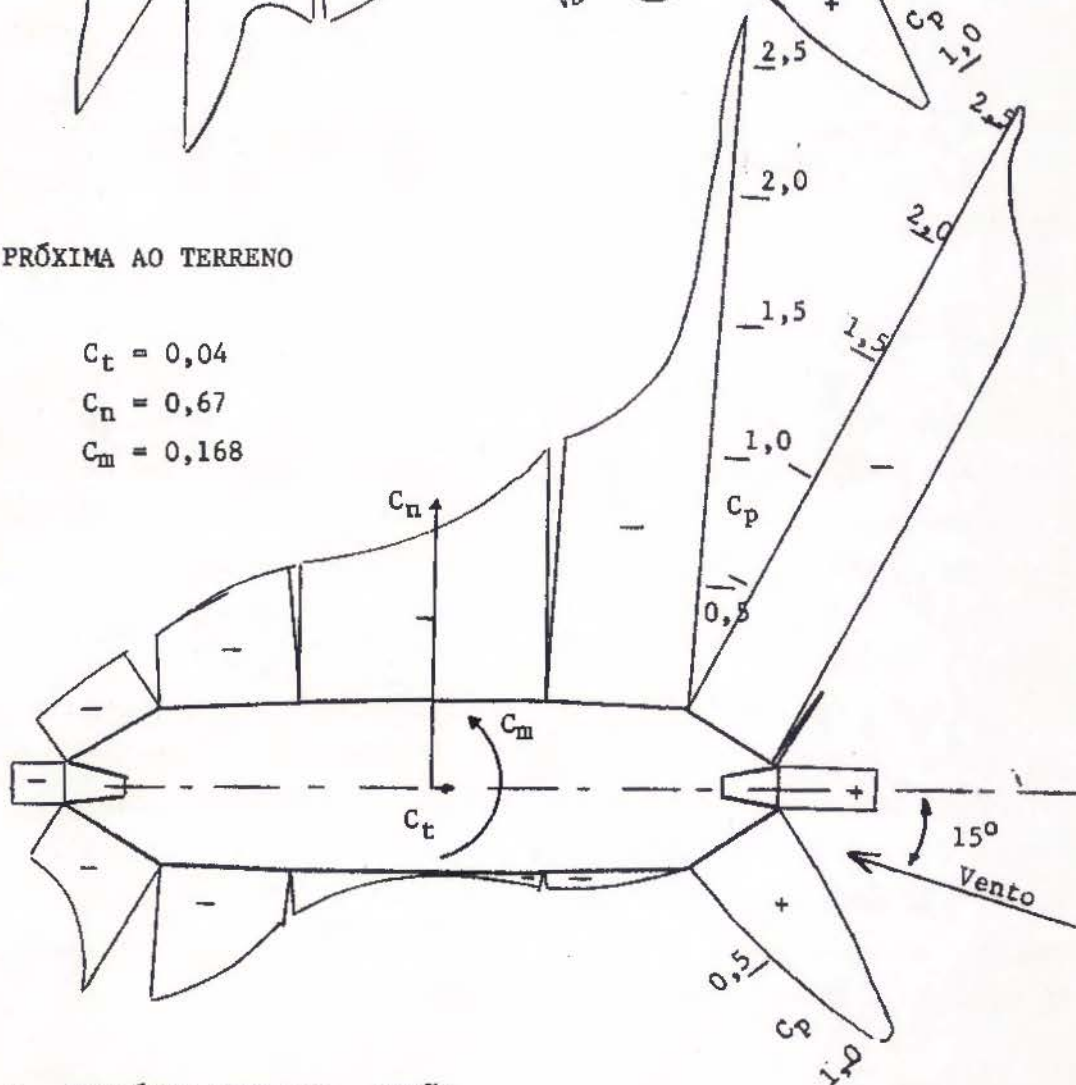


ZONA PRÓXIMA AO TERRENO

$$C_t = 0,04$$

$$C_n = 0,67$$

$$C_m = 0,168$$



ensaios. Irminger e Nøkkentved, ensaiando modelo de construção com telhado a 2 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 a diante.

h) Valores elevados de sucção aparecem também em marquises de estádios e hipódromos. A norma suíça 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 paralelepipedicas, com o vento incidindo normalmente a uma das fachadas, a força de arrasto coincide com a resultante horizontal das forças do vento.

$$C_a = \frac{\text{Arrasto}}{\rho S}$$

S → área da fachada perpendicular à direção do vento.

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

Como pode se constatar, é boa a concordância dos 2 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, da Bélgica.

O ângulo de 90° corresponde a vento normal à fachada maior, e

QUADRO 1

Coeficiente de Arrasto " C_a "

Modelo e Dimensões $1 \times b \times h$	α	E	Valores de " C_a "				
			NB-5	NV-46	NV-65	Pris	Autor
A 20 × 8 × 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 × 8 × 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 × 5 × 50	0°	10	1,6	1,58	1,70	1,70	1,64
D 12,5 × 5 × 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 × 3,2 × 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 × 3,2 × 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 × 6,4 × 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 × 3,2 × 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 × 6,4 × 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 "1"
 $\alpha = 90^\circ$: vento perpendicular à dimensão "1"
 E → Alçamento → = $h/1$ para $\alpha = 90^\circ$
 = h/b para $\alpha = 0^\circ$

0° a vento normal à fachada menor.

2.5 - PRESSÃO INTERNA

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

- "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-46, ou a NV-65, que manteve a NV-46 para certos casos simples:

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

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

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

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

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 5 m²) e de peças secundárias:

$$C_i = + 1,0 \quad \text{e} \quad - 0,7, \text{ respectivamente.}''$$

Temos 2 observações a fazer:

19 - D'Havé mostrou que para uma permeabilidade de parede variando de 5 a 50% não há alteração nas pressões internas. Portanto, já a partir de 5% deve-se considerar a construção com "grandes aberturas".

29 - 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.

$$\begin{aligned} \text{Pela NB-5} \rightarrow C_i &= + 0,5 \quad ; \quad C_e = - 0,5 \\ \text{Total (fôrça para o exterior): } C &= 1,0 \end{aligned}$$

Por ensaios e NV-65:

$$\begin{aligned} C_i &= + 0,8 \quad ; \quad C_e = - 1,1 \quad (\text{dependendo das pro-} \\ & \hspace{15em} \text{porções)} \\ \text{Total (fôrça para o exterior): } C &= 1,9 \end{aligned}$$

Isto é, um valor praticamente duplo do da norma.

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 pêso 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 tri-articulados 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 fôrça 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

a) Algumas breves notas sôbre ensaios que realizamos em cúpulas, no túnel aerodinâmico de 2 m do Centro Técnico de Aeronáutica, São José dos Campos.

As duas séries de modelos ensaiados, num total de 16, aparecem nas figuras 11 e 12. Fotografias de dois dêles aparecem na figura 13.

Os ensaios tiveram por objetivo estudar:

+ 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 3 posições:

1º - afastamento nulo: cúpula assente na plataforma;

2º - afastamento médio: cúpula sôbre pilares ou paredes de 3 cm de altura;

3º - afastamento grande: cúpula sôbre pilares ou paredes de 6 cm de altura.

+ efeitos da permeabilidade da parede, para os itens 2º e 3º dados acima:

1º - parede normalmente fechada (porém não estanque);

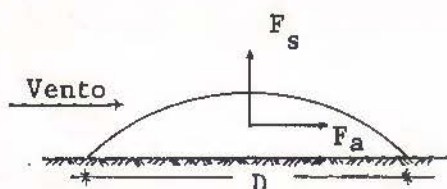
2º - parede com muitas aberturas uniformemente distribuídas;

- 3φ - parede com 1 portão e permeabilidade normal;
- 4φ - parede com 2 portões e permeabilidade normal;
- 5φ - parede com 2 portões e aberturas uniformemente distribuídas.

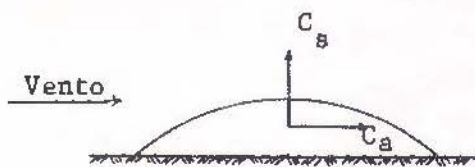
3.2 - SUSTENTAÇÃO E ARRASTO

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
Coeficientes de Sustentação e de Arrasto



$$C_a = F_a/qS$$



$$C_s = F_s/qS$$

$$S = \pi D^2/4$$

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 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 de referência seja 130 km/h:

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

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 2 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

a) Alguns dos perfis obtidos, em plano vertical paralelo à direção do vento, aparecem nas Figuras 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

a) 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).

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 bem superiores foram obtidos nas cúpulas sobre paredes com 1 portão, situando-se este bem 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, cū

pula 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 $\rightarrow c_{pe} = -0,50$
interior $\rightarrow c_{pi} = +0,76$
Total $c_p = -1,26$

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

Modelo II-11 : exterior $\rightarrow c_{pe} = -0,63$
interior $\rightarrow c_{pi} = +0,79$
Total $c_p = -1,42$

Para um vento de 130 km/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, bem como das estruturas que os sustentam.

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

- 1 - Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq).
- 2 - Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento (IPD) do Centro Técnico de Aeronáutica (CTA), São José dos Campos, SP.
- 3 - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

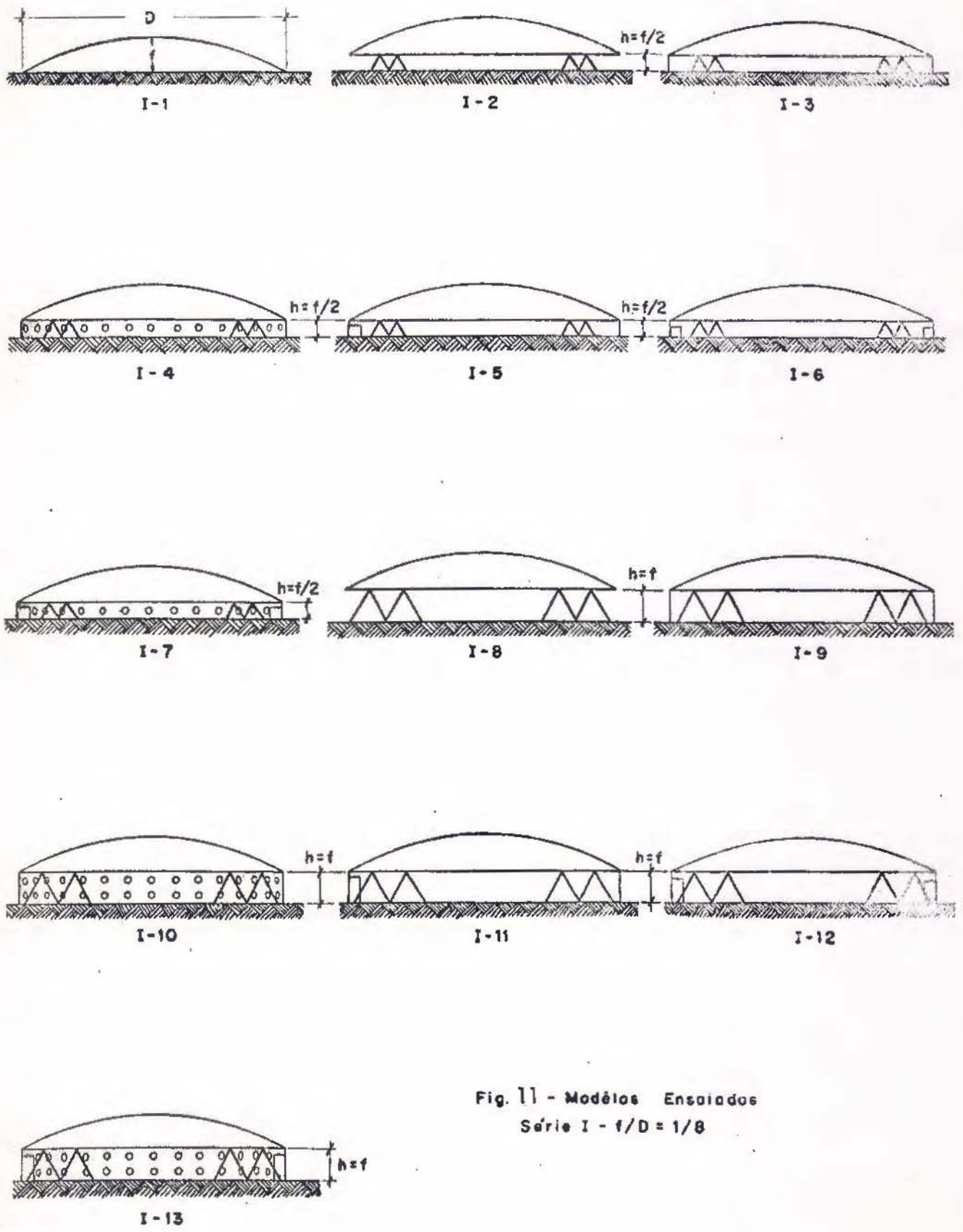


Fig. 11 - Modelos Ensaados
 Série I - $f/D = 1/8$

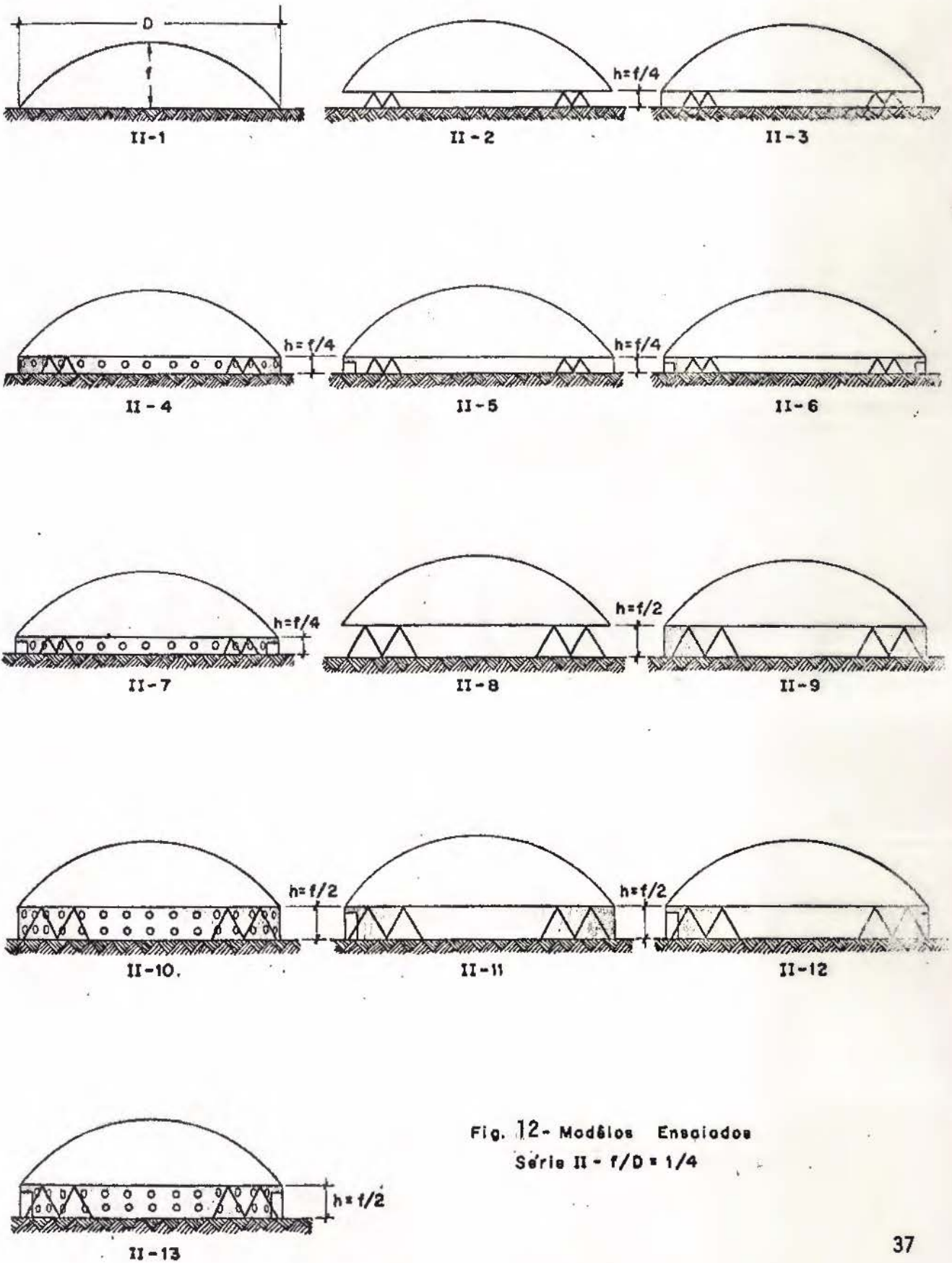
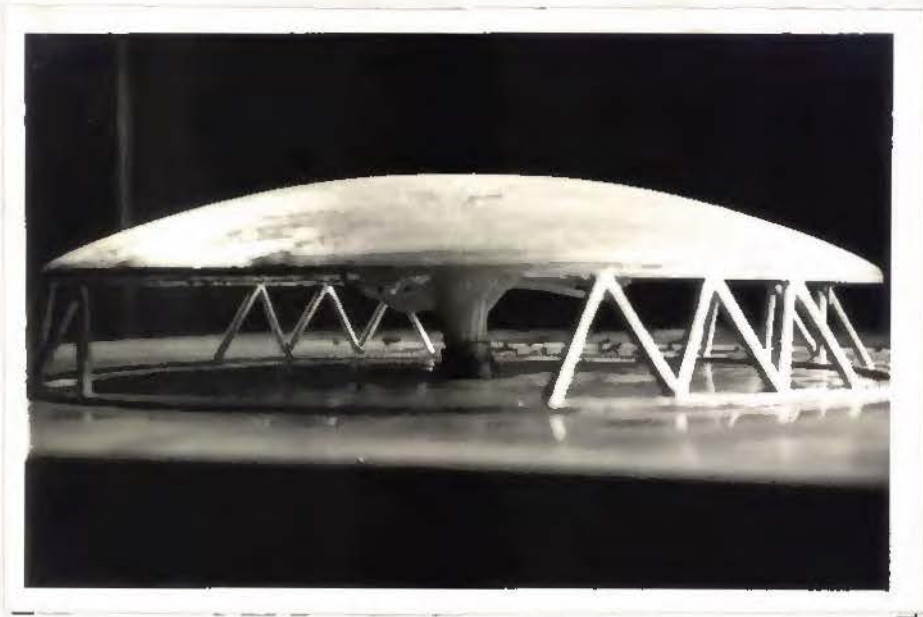


Fig. 12- Modelos Ensayados
 Série II - $f/D = 1/4$



Modêlo I-8



Modêlo II-13

Fig. 13

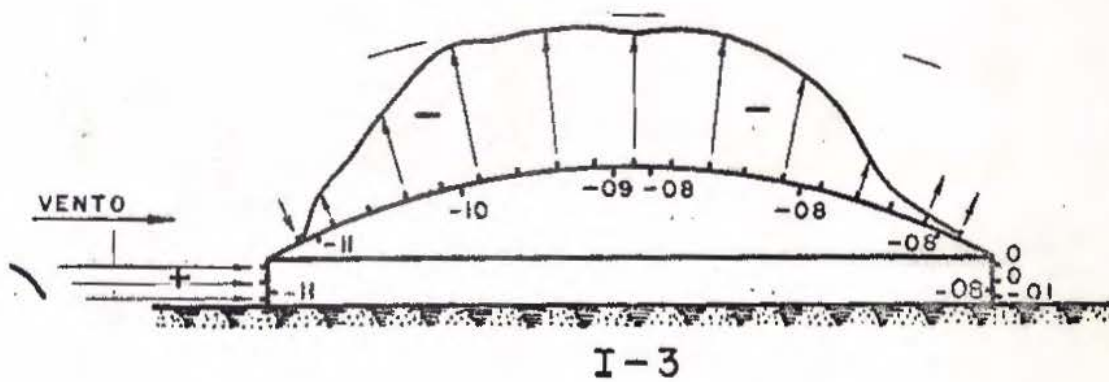
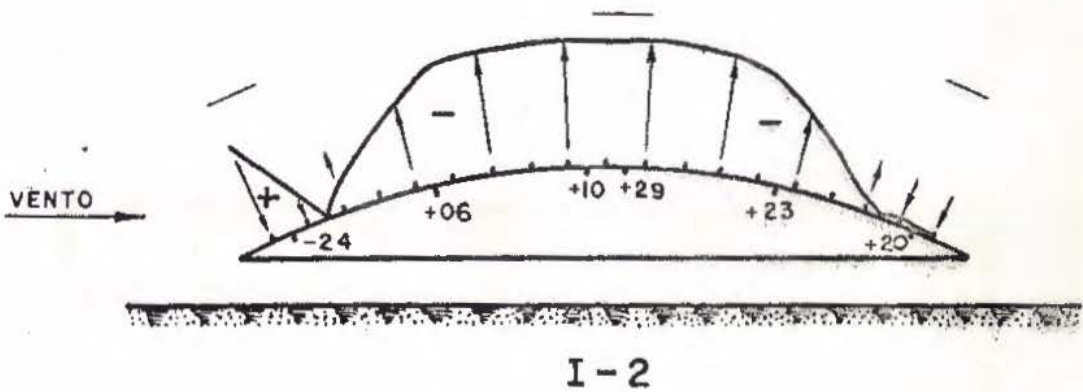
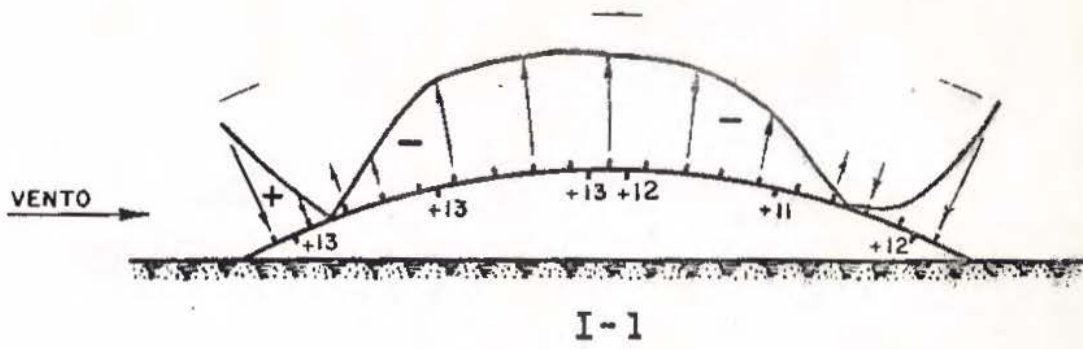
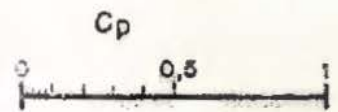


Fig. 14. PERFIS DE PRESSÃO

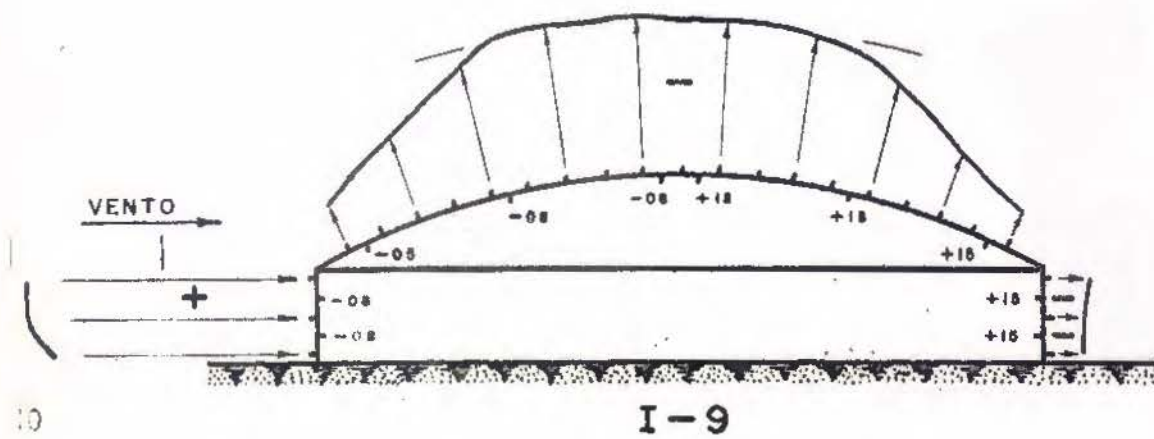
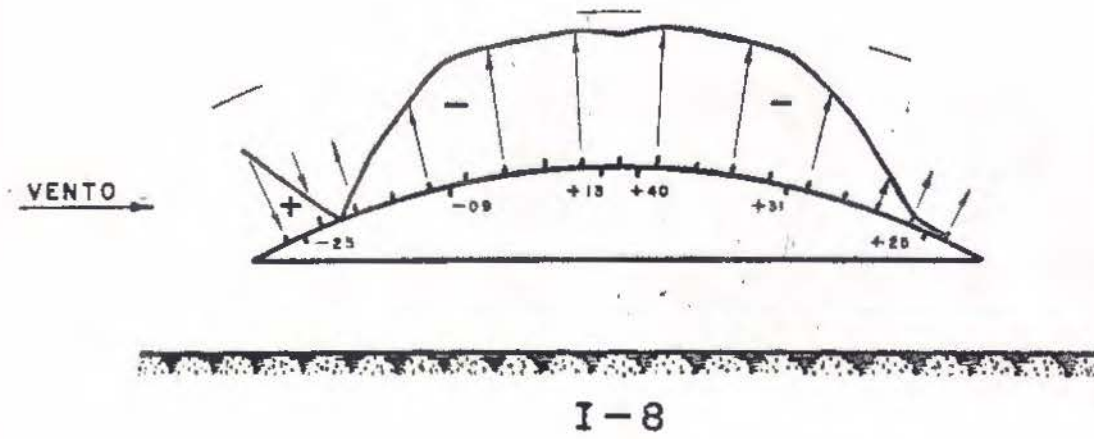
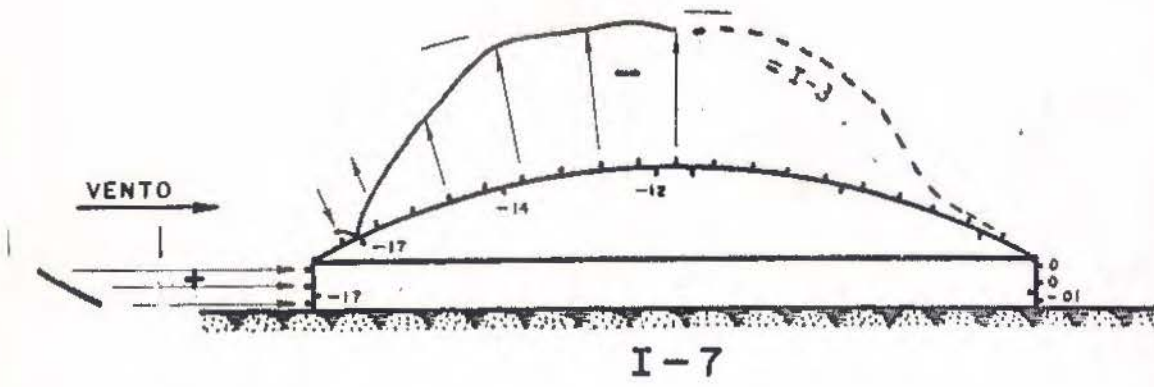
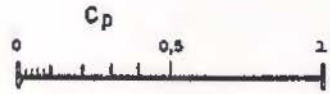
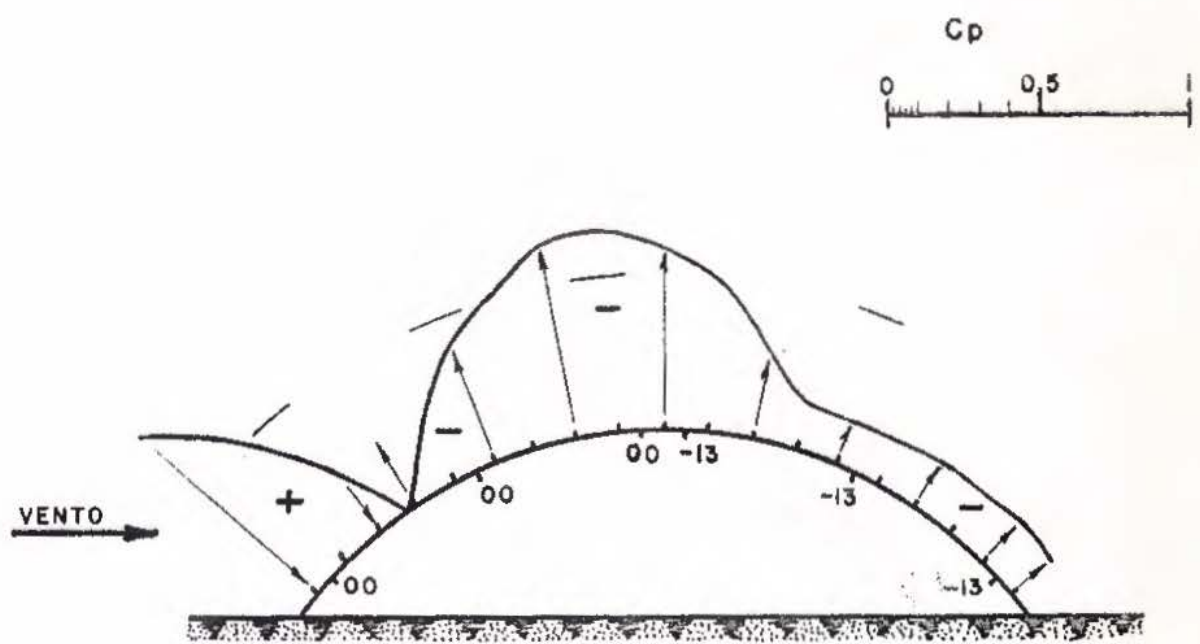
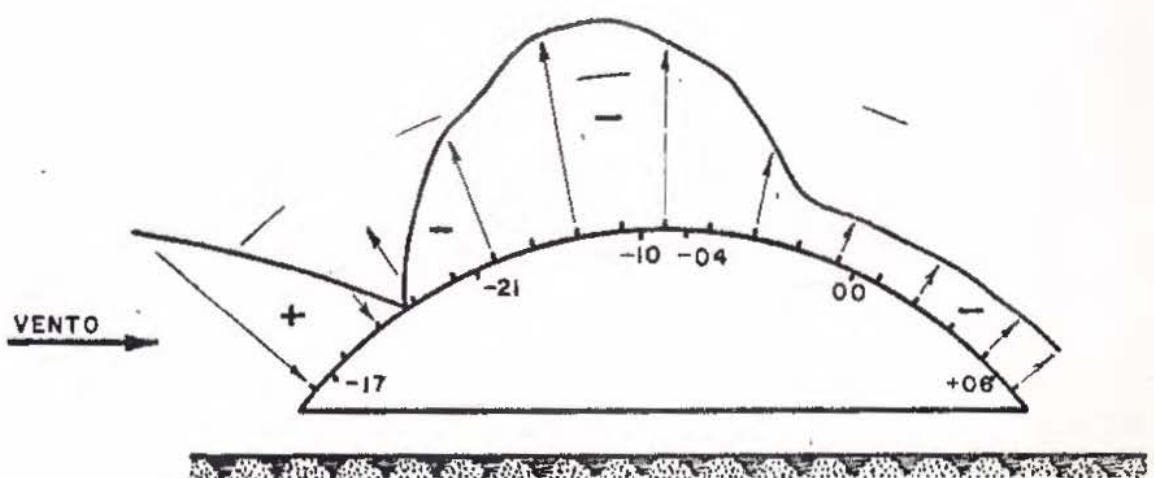


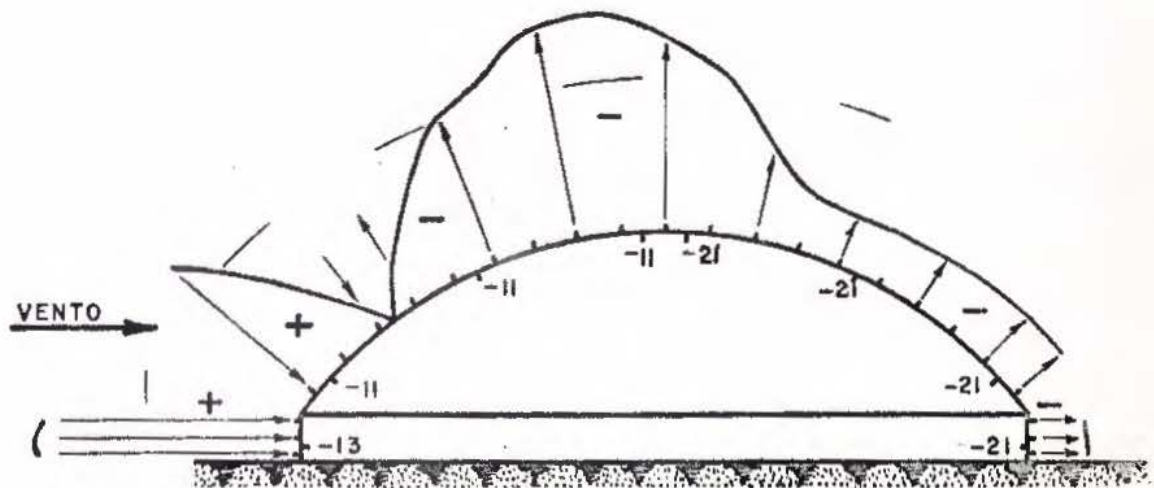
Fig 15 PERFIS DE PRESSÃO



II-1



II-2



II-3

Fig. 16 PERFIS DE PRESSÃO



ÍNDICE

- 1 - NOÇÕES DE AERODINÂMICA / 7
 - 1.1 - Introdução / 7
 - 1.2 - Pressão de Obstrução / 7
 - 1.3 - Coeficiente de Pressão / 11
 - 1.4 - Coeficiente de Forma / 12
 - 1.5 - Coeficiente de Força Global / 13
 - 1.6 - Coeficiente de Torção / 13
 - 1.7 - Interação / 13
- 2 - VENTO EM EDIFÍCIOS / 15
 - 2.1 - Influência da Altura / 15
 - 2.2 - Influência da Profundidade / 16
 - 2.3 - Sucções Locais / 17
 - 2.4 - Coeficiente de Arrasto / 27
 - 2.5 - Pressão Interna / 29
- 3 - VENTO EM CÚPULAS / 31
 - 3.1 - Modelos Ensaiaados / 31
 - 3.2 - Sustentação e Arrasto / 32
 - 3.3 - Perfis de Pressão / 34
 - 3.4 - Pressão Interna / 34
 - 3.5 - Valores Locais Máximos / 35

ÍNDICE DAS FIGURAS

- Fig. 1 - / 8
- Fig. 2 - / 10
- Fig. 3 - / 14
- Fig. 4 - Pressões em Modelos de Construções / 18
- Fig. 5 - Perfis de Pressão / 19
- Fig. 6 - Dimensões Nominais em cm / 20
- Fig. 7 - Perfis Horizontais de Pressão / 22
- Fig. 8 - Modelo E / 23
- Fig. 9 - Edifício Pirelli, Milão / 26
- Fig. 10 - Valores de C, Cg e excentricidades / 24
- Fig. 11 - Modelos Ensaiaados / 36
- Fig. 12 - Modelos Ensaiaados / 37
- Fig. 13 - Modelo I.8 e Modelo II-13 / 38
- Fig. 14 - Perfis de Pressão / 39
- Fig. 15 - Perfis de Pressão / 40
- Fig. 16 - Perfis de Pressão / 41





edições urgs

Série Engenharia Estrutural

EE-1 — *Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas*

J. Blessmann

a seguir:

- ***Acidentes Causados pelo Vento***
J. Blessmann
- ***Intervalo de Tempo para Cálculo da Velocidade Básica do Vento***
J. Blessmann
- ***Considerações sobre Alguns Tópicos para uma Norma de Vento***
J. Blessmann
- ***Estudo Aerodinâmico do Hotel Tropical de Manaus***
J. Blessmann
- ***Vento em Cúpulas***
J. Blessmann
- ***Comentários de Alguns Tópicos de Normas de Vento***
J. Blessmann
- ***Vento em Construção. Um Estudo Experimental***
J. Blessmann