

INFLUÊNCIA DO TIPO DE ABERTURA E DAS CARACTERÍSTICAS DO VENTO  
SIMULADO NA PRESSÃO INTERNA EM UM PAVILHÃO INDUSTRIAL

ACIR MERCIO LOREDO SOUZA

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre  
Abril de 1992

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA** e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. Joaquim Blessmann  
Orientador



Prof. Ademar Gilberto Groehs  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil

**BANCA EXAMINADORA**

- Prof. Joaquim Blessmann (Orientador)  
Dr., ITA/SP
- Prof. Jacek Piotr Gorecki  
Ph.D., Caltech, USA
- Prof. José Carlos Ferraz Hennemann  
Ph.D., S.M.U., USA

Ao Prof. Blessmann,  
às minhas irmãs, Ana Luisa e Ana Cláudia,  
aos meus avós, Aniceto e Nilza,  
e em especial à minha esposa Adriana  
e aos meus pais Acir e Beth.

## AGRADECIMENTOS:

Ao Prof. Joaquim Blessmann pela dedicada orientação, amizade, exemplo e ensinamentos transmitidos.

Aos professores do CPGEC da UFRGS, em especial ao Prof. José Carlos Ferraz Hennemann e ao Prof. Alberto Tamagna pela amizade e incentivo.

Aos funcionários do CPGEC, em especial a Paulo Francisco Bueno, pela amizade, incentivo e apoio.

Aos colegas do curso pelo convívio e excelente ambiente de trabalho proporcionado. Em especial aos meus grandes amigos Juan Pablo Raggio Quintas e Cláudio Enrique Campos Rubio pelo incentivo e confiança, e também a Cristina de A. Hagemann pela ajuda na parte experimental.

Ao Prof. Jacek Piotr Gorecki pela criteriosa análise e valiosas sugestões para o prosseguimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro proporcionado.

A meus pais, familiares e amigos, pelo estímulo e confiança que sempre demonstraram, em especial a Mãe e a Adriana pela paciência e compreensão...

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
SIMBOLOGIA.....	ix
TERMINOLOGIA.....	xi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações preliminares.....	1
1.2 Histórico.....	3
1.3 Exemplos de acidentes devidos à P.I.....	5
2 - ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA E OBJETIVO DO TRABALHO.....	8
2.1 Coeficientes.....	8
2.2 Formulação teórica.....	11
2.3 Objetivo do trabalho.....	22
3 - CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	23
3.1 Objetivo dos ensaios.....	23
3.2 Modelos ensaiados.....	23
3.2.1 Modelo de pressão externa.....	24
3.2.2 Modelo de pressão interna.....	26
3.3 Equipamento.....	31
3.3.1 Túnel de vento.....	31
3.3.2 Aparelhagem.....	33
4 - ENSAIOS.....	35
4.1 Descrição dos ensaios.....	35
4.1.1 Pressão dinâmica e velocidade.....	35
4.1.2 Pressão estática de referência.....	36
4.1.3 Montagem.....	37

4.1.4	Ordem dos ensaios para o modelo de P.I.....	38
4.1.5	Estanqueidade do modelo de P.I.....	43
4.1.6	Ensaios.....	45
4.2	Tipos de vento.....	45
5	- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	48
5.1	Resultados.....	48
5.2	Análise e discussão.....	62
5.2.1	Vento turbulento e deslizante.....	62
5.2.2	Vento suave e uniforme.....	74
6	- COMENTÁRIOS FINAIS.....	92
6.1	Conclusões.....	92
6.2	Recomendações.....	95
6.3	Sugestões para futuras pesquisas.....	96
	BIBLIOGRAFIA.....	98

## RESUMO

Foram estudadas experimentalmente, em túnel de vento, as pressões internas (P.I.) que ocorrem, devidas ao vento, em um modelo de edificação e estabeleceu-se uma fórmula que melhor se ajusta aos resultados nas condições dos ensaios.

A P.I. foi medida em um modelo de pavilhão industrial térreo (sem divisões internas), com cobertura a duas águas inclinadas de  $12^\circ$  e forma em planta retangular de proporções  $a \times b \times h = 2 \times 1 \times 0,25$ . A direção do vento foi a variável principal nos ensaios, utilizando-se como parâmetros o número, a forma e a disposição geométrica das aberturas; os ensaios abrangeram assim 233 casos diferentes. Os ensaios foram realizados:

1) com Número de Reynolds (baseado na altura da cumeeira) da ordem de 107.000, numa corrente deslizante e turbulenta (intensidade de turbulência de 15%) que simulava o perfil de velocidades do vento natural, com expoente  $p = 0,23$ ;

2) com Número de Reynolds da ordem de 172.000 numa corrente de ar suave e uniforme.

Os ensaios com vento turbulento e deslizante indicam a validade da fórmula mais usual, do tipo  $Q = K A (\Delta p)^n$ , com um valor de  $n$  em torno de 0,65, para  $K$  considerado constante, e abertura dominante com área igual ou superior ao dobro ( $N \geq 2$ ) da área da porosidade distribuída. As pressões internas mostram pouca variação espacial, justificando o uso de apenas um coeficiente interno ( $C_i$ ) para toda a edificação. Constata-se também que o tipo de abertura tem influência no comportamento da pressão interna, e que o tipo de vento exerce somente uma influência indireta na P.I., através da pressão externa.

## ABSTRACT

An experimental study of the wind-induced internal pressure (I.P.) on a model building was made in a wind tunnel and a formula was established which allows the best fit of the results.

The I.P. was measured on a model of a low-rise single compartment industrial building, with a two-pitch roof of  $12^\circ$  slope, and a rectangular planform with proportions  $a \times b \times h = 2 \times 1 \times 0,25$ . Wind direction was the main test variable; the number, shape and geometrical arrangement of the openings were used as parameters; about 230 different cases were studied:

1) with a Reynold's number (based on ridge height) of about 107 000, in a turbulent shear flow (turbulence intensity 15%) which simulated the velocity profile of the natural wind, with an exponent  $p = 0,23$ ;

2) with a Reynold's number of the order of 172 000 in a smooth uniform stream.

Results with a turbulent shear flow show that a flow equation of the form  $Q = K A (\Delta p)^n$  can be used, with a flow exponent value around 0.65, assuming a constant value for K, and dominant opening twice as large as the sum of the distributed porosity of the building ( $N \geq 2$ ). The I.P. show little spatial variation, justifying the assumption of a constant value of the internal pressure coefficient ( $C_i$ ) for the whole building. The opening type is found to exert some influence on the I.P. behavior, while the influence of the incident flow is more indirect, through the external pressure.

## SIMBOLOGIA

### Letras romanas

- A - Área de uma superfície plana sobre a qual é calculada a força exercida pelo vento, a partir dos coeficientes de forma  $C_e$  e  $C_i$  (força perpendicular à superfície); área de parede; área de orifício.
- $A_j$  - Área da abertura de ordem j.
- C - Coeficiente de forma;  $C = C_e - C_i$
- $C_e$  - Coeficiente de forma externo;  $C_e = F_e / (q A)$
- $C_i$  - Coeficiente de forma interno;  $C_i = F_i / (q A)$
- F - Força em uma superfície plana de área A, perpendicular à respectiva superfície.
- $F_e$  - Resultante das pressões externas atuantes sobre uma superfície plana.
- $F_i$  - Resultante das pressões internas atuantes sobre uma superfície plana.
- $I_1$  - Intensidade da componente longitudinal da turbulência.
- $L_1$  - Macroescala da componente longitudinal da turbulência.
- K - Coeficiente de vazão.
- N - Número de vezes em que a área da abertura dominante é maior que a área total das outras aberturas existentes nas faces da construção; número de aberturas.
- Q - Vazão volúmica de ar.
- Re - Número de Reynolds ( $= \bar{V} h_c / \nu$ ).
- T - Temperatura na câmara de ensaios [ K ].
- $\bar{V}$  - Velocidade média de referência do vento.
- a - Lado maior: a maior dimensão horizontal de uma edificação.
- b - Lado menor: a menor dimensão horizontal de uma edificação.
- $c_p$  - Coeficiente de pressão:  $c_p = c_{pe} - c_{pi}$
- $c_{pe}$  - Coeficiente de pressão externa:  $c_{pe} = \Delta p_e / q$

- $c_{pi}$  - Coeficiente de pressão interna:  $c_{pi} = \Delta p_i / q$   
 $h$  - Altura de parede.  
 $h_c$  - Altura da cumeeira do modelo.  
 $n$  - Expoente de escoamento.  
 $p$  - Expoente da lei potencial de velocidades do vento.  
 $p_a$  - Pressão atmosférica.  
 $q$  - Pressão dinâmica ao longe:  $q = (1/2) \rho \bar{V}^2$   
 $t$  - Temperatura na câmara de ensaios [ °C ].  
 $z_d$  - Deslocamento do plano zero.  
 $z_o$  - Comprimento de rugosidade.

### Letras gregas

- $\alpha$  - Ângulo de incidência do vento, medido entre a direção do vento e o lado maior da edificação.  
 $\Delta p$  - Pressão efetiva em um ponto na superfície de uma edificação:  $\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i$   
 $\Delta p_A$  - Diferença de pressões estáticas entre os anéis piezométricos do túnel de vento.  
 $\Delta p_e$  - Pressão efetiva externa: diferença entre a pressão em um ponto na superfície externa da edificação e a pressão do vento incidente, a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela presença de obstáculos.  
 $\Delta p_i$  - Pressão efetiva interna: diferença entre a pressão em um ponto na superfície interna da edificação e a pressão do vento incidente, a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela presença de obstáculos.  
 $\nu$  - Viscosidade cinemática do ar.  
 $\theta$  - Ângulo de inclinação do telhado.

### Abreviaturas

- P.E. Pressão externa ou pressões externas.  
 P.I. Pressão interna ou pressões internas.

## TERMINOLOGIA

BARLAVENTO ("windward"): Região de onde sopra o vento em relação ao modelo ou construção real.

CAMADA LIMITE ("boundary layer"): Fina camada de fluido situada nas proximidades dos contornos dos sólidos imersos na corrente, onde são importantes os efeitos da viscosidade.

ESCALA DE TURBULÊNCIA ("turbulence length scale"): é uma dimensão proporcional ao comprimento médio dos maiores turbilhões presentes no escoamento incidente. Neste trabalho, o termo refere-se à componente longitudinal da turbulência.

ESTEIRA ("wake"): é a zona do escoamento descolado a sotavento das linhas de separação, com turbilhões de tamanhos e velocidades muito variáveis.

ESCOAMENTO INCIDENTE ("approaching flow, free stream"): é o escoamento não perturbado que se aproxima do modelo ou construção real.

ESCOAMENTO SUAVE ("smooth flow"): Escoamento incidente de intensidade de turbulência muito baixa ( $I_1 < 1,0\%$  ou  $2,0\%$ ).

ESCOAMENTO TURBULENTO ("turbulent flow"): Escoamento incidente de intensidade de turbulência considerável ( $I_1 > 1,0\%$  ou  $2,0\%$ ).

INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA ("turbulence intensity"): é a razão entre o desvio padrão das flutuações da velocidade do escoamento incidente e sua velocidade média. Neste trabalho, o termo refere-se à componente longitudinal da turbulência.

LINHA (PONTO) DE SEPARAÇÃO ("separation line, point"): Linha (ponto) onde a camada limite separa-se da superfície do sólido, e origina-se um escoamento reverso.

PRESSÃO DINÂMICA ("dynamic pressure"):  $q = 1/2 (\rho \bar{V}^2)$ .

PRESSÃO ESTÁTICA ("static pressure"): limite da relação entre a força exercida perpendicularmente a uma superfície e a área desta superfície, quando esta área tende para zero.

SOBREPRESSÃO ("pressure"): Pressão (estática) efetiva acima da pressão atmosférica de referência, sinal positivo.

SOTAVENTO ("leeward"): Região oposta àquela de onde sopra o vento em relação ao modelo ou construção real.

SUCÇÃO ("suction"): Pressão (estática) efetiva abaixo da pressão atmosférica de referência, sinal negativo.

TURBULÊNCIA ("turbulence"): Flutuações irregulares da velocidade do escoamento, reguladas por equilíbrio estatístico.

VENTO DESLIZANTE ("shear wind"): Vento natural ou produzido em túneis de vento onde a velocidade não é uniforme, mas aumenta com a altura (há um perfil não uniforme de velocidades).

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações preliminares

A pressão no interior de uma edificação pode sofrer alteração principalmente devido a três fatores:

- 1) Ação do vento;
- 2) Gradientes térmicos entre o interior e o exterior da edificação;
- 3) Ventilação mecânica.

Portanto, o escoamento de ar através da edificação, que é função da diferença de pressão entre o exterior e o interior da mesma, também será afetado por estes três fatores.

O estudo isolado dos fatores (2) e (3) não tem sentido para fins estruturais, em edificações comuns. O fator (2), conhecido na literatura internacional como "efeito chaminé" ("stack effect") pode produzir uma diferença de pressão de até 100Pa, aproximadamente (Ref. 17). Tanaka e Lee<sup>30</sup>, em um estudo isolado deste segundo fator, concluíram que seu efeito é comparável à pressão induzida por um vento de velocidade média em torno de 12m/s, mas na época de frio mais intenso do inverno canadense. Janeiro Borges e outros<sup>34,35</sup> estudaram o efeito combinado dos fatores (1) e (2), em modelos de edificações baixas, tratando de problemas de ventilação.

Um estudo combinado dos fatores (1) e (3) foi realizado por Lee, Liang e Tanaka<sup>30</sup>. Os autores concluem que, quando se dá a ocorrência simultânea dos efeitos devidos à ação do vento e os devidos à ventilação mecânica, os efeitos combinados dos dois fatores não podem ser simplesmente somados de maneira linear.

O que deve haver, em sistemas de ventilação mecânica, é um controle da P.I. para que esta seja mantida a um valor tal que não exerça uma influência significativa no projeto estrutural.

Aborda-se, nessa dissertação, o efeito isolado do primeiro fator.

As pressões internas causadas pelo vento em edificações têm recebido bem menos atenção, por parte dos pesquisadores, do que as pressões externas. E isto é verdade mesmo considerando-se o fato de que o carregamento devido à P.I. pode vir a constituir-se em uma alta parcela da carga total devida ao vento, especialmente em edificações tipo pavilhões industriais e casas para moradia ou comércio, tanto na estrutura como um todo como nas partes de revestimento (vidros, telhas, painéis, etc.). Este fato é de extrema importância pois encontram-se descritos na literatura especializada (Refs. 8, 12, 16 e 44), diversos acidentes, com ruína total ou parcial da edificação, em que a mesma ocorreu, ou teve início, devido a uma falha local (arrancamento de um vidro ou telha, ou mesmo quebra devido a algum projétil). Harris<sup>2º</sup> também chama atenção para este fato, salientando que a estimativa correta do carregamento em elementos individuais de revestimento da edificação é de fundamental importância, sendo a principal responsável por sua segurança.

Neste trabalho é desenvolvido um estudo em um modelo de um pavilhão industrial, com uma série de combinações de aberturas nas paredes do mesmo. Este é submetido a dois tipos de vento: um deslizante e turbulento, e o outro uniforme e suave. O primeiro, e mais importante, é o que realmente interessa para aplicação prática, pois é uma simulação do vento natural. O segundo tem uma aplicação prática imediata em estudos de ventilação, com brisas, que podem ser suaves e tendendo para a uniformidade. Apesar disso, torna-se de grande utilidade neste tipo de estudo, servindo como um termo de comparação, pois é um tipo de escoamento que não apresenta flutuações e, portanto, não há variações temporais dos coeficientes de pressão.

## 1.2 - Histórico

Os ensaios relacionados especificamente ao estudo das pressões no interior de edificações tiveram início há, apenas, pouco mais de 60 anos. Relacionam-se, a seguir, os estudos mais clássicos no assunto, tentando enquadrar os trabalhos de acordo com o objetivo perseguido pelo(s) autor(es), que são:

### a) Influência da permeabilidade das paredes:

Irminger e Nøkkentved<sup>32</sup>: estudos experimentais em modelos de construções fechadas, com até 5,4% de aberturas em cada parede.

Haddon<sup>28</sup>: ensaios em modelos com planta retangular e várias posições de uma mesma abertura.

Wilson<sup>64</sup>: ensaios feitos na Universidade de Melbourne, Austrália, com modelo de pavilhão industrial.

D'Have<sup>25,26</sup>: ensaios de modelos cúbicos com cobertura horizontal ou a duas águas com inclinação de 30°.

Newberry<sup>45</sup>: estudo em um edifício de escritórios de 15 pavimentos. Durante ventos fortes eram abertas e fechadas portas e janelas, em várias combinações, para o estudo de sua influência na distribuição da P.I.

Davenport, Surry e Stathopoulos<sup>24,50</sup>: ensaios em túnel de vento com simulação das condições naturais, de modelos de edificações baixas com diversas permeabilidades.

### b) Influência de lanternins:

Flachsbart<sup>27</sup>: modelo de gasômetro com lanternim.

Seiferth<sup>51</sup>: modelo de gasômetro com lanternim.

Arnstein e Klemperer<sup>2</sup>: modelo de hangar, com oito chaminés de ventilação.

Eifel (citação de Irminger e Nøkkentved<sup>32</sup>): modelo de hangar com lanternins abertos.

Irminger e Nøkkentved<sup>33</sup>: ensaios em modelos com telhados curvos e a duas águas com lanternim aberto para estudo da P.I. e P.E.

Whitbread e Packer<sup>63</sup>: ensaios sobre a influência de um pequeno lanternim nas P.I. de um prédio escolar de proporções semelhantes às de um pavilhão industrial.

D'Have<sup>25,26</sup>: ensaios sobre a variação da P.I. devido à presença de lanternins abertos.

Blessmann<sup>11</sup>: modelo de cúpula hemisférica com lanternim no topo e permeabilidade zero nas paredes.

Blessmann<sup>9</sup>: modelo de ginásio com cobertura tronco-piramidal e lanternim no topo.

c) Estudos para o cálculo da P.I.:

Dick (citação de Sexton<sup>52</sup>): estudos experimentais sobre ventilação natural conduziram a uma fórmula para o cálculo da P.I.

Pris<sup>48</sup>: cálculo do coeficiente de P.I. em um cubo com várias situações de aberturas.

Estudos mais atuais em construções reais e em túneis de vento, sob corretas condições de simulação do vento natural, realizados com o intuito de obter fórmulas e/ou coeficientes para a determinação da P.I., bem como os efeitos sobre as P.I. e P.E. devidos à aberturas ou permeabilidade disseminada, são citados a seguir:

Holdø et al.<sup>30</sup>: estudos experimentais em túnel de vento e por métodos teóricos (estudo comparativo). Medição de pressões médias e flutuantes, estudando o efeito, sobre estas pressões, da permeabilidade da edificação.

Holmes<sup>31</sup>: mediu valores médios e flutuantes em um modelo com telhado a duas águas e vários tamanhos de um mesmo tipo de abertura.

Kandola<sup>36</sup>: estudo sobre a influência da permeabilidade das paredes sobre as P.E.

Stathopoulos et al.<sup>57</sup>: estudos em modelos de construções baixas, com coberturas a duas águas e vários tipos de aberturas.

Stathopoulos e Kozutsky<sup>55</sup> : estudos comparativos, experimentais e analíticos sobre vários tipos de edificações. Indicam um valor para o expoente de escoamento  $n$ .

Liu e Saathoff<sup>40,42,50</sup> : sugerem uma fórmula empírica para edificações com duas aberturas.

Davenport<sup>21,22,23</sup> : sugere um cálculo linear para a obtenção do coeficiente de P.I.

Outros estudos são citados nos capítulos seguintes.

### 1.3 - Exemplos de acidentes devidos à P.I.

A maior causa dos acidentes devidos à P.I. é quando são estabelecidas na edificação sobrepressões internas, principalmente quando aliadas a fortes sucções externas.

A seguir são dados alguns exemplos típicos de acidentes que tiveram como causa principal este fator. Os acidentes citados encontram-se descritos em detalhe, inclusive com fotos e figuras, em Blessmann<sup>8,12</sup>.

a) Grupo Escolar em Júlio de Castilhos, RS. Temporal da noite de 29 de agosto de 1961. O vento incidiu obliquamente a uma das fachadas, justamente a que possuía uma parte em elementos vazados, situados perpendicularmente a uma parede maciça de pedra. A alta sobrepressão externa reinante naquela zona foi imediatamente transmitida ao interior da construção através dos elementos vazados. Esta sobrepressão interna somou sua ação ascensional à sucção externa (inclinação do telhado:  $12^\circ$ ), arrancando todo o telhado (cobertura e estrutura) e grande parte das vigas de ancoragem do mesmo.

b) Clube Social na praia do Curumim, RS. Temporal de 30 de novembro de 1961. O telhado movia-se como uma membrana, para cima e para baixo. Em determinado instante, toda a cobertura literalmente levantou vôo, imediatamente depois de terem sido rompidos os vidros da frente. O telhado, levando junto lustres e lâmpadas que nele estavam pendurados, foi parar a cerca de 40m do local. Telhado a duas águas com pequena inclinação. Causa do acidente: alta sobrepressão interna,

devido à ruptura dos vidros, aliada à alta sucção externa. A falta de ancoragem permitiu o acidente.

c) Pavilhão da FENAC, Novo Hamburgo, RS. Abril de 1963. Pavilhão com 40x100m de área em planta, cobertura curva com arcos triarticulados, de treliça metálica. Vento quase axial, pela frente. Ainda não estavam colocados os vidros do oitão da frente. Os portões, com 12m<sup>2</sup>, estavam abertos na frente (três) e nas laterais (quatro). Os dois portões das paredes dos fundos estavam fechados, e o oitão desta parede já tinha os vidros colocados. Nestas condições, o esforço de sobrepressão interna somou seus efeitos à sucção externa. A força ascensional levantou a cumeeira do telhado e inverteu o sentido do empuxo nos dois apoios. A vinculação destes era incompleta, apta a resistir apenas a empuxo de dentro para fora. Com a inversão deste, os dois extremos dos arcos correram para dentro e o telhado caiu no interior do pavilhão.

d) Pavilhão industrial no estado de São Paulo. Dezembro de 1970. Pavilhão com 100x55m em planta, telhado curvo. 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, e só nesta parede, além de um beiral ao longo da mesma. As paredes de barlavento e de sotavento estavam com os portões abertos quando iniciou a ventania. No interior dever-se-iam ter sobrepressões ou sucções, ou ambas, porém de pequeno valor. Como estava entrando muito vento no pavilhão, alguns operários fecharam os portões de barlavento. Desta forma, no interior passou a reinar 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; caso 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 dos 9m iniciais da cobertura.

e) Outras descrições de acidentes com esta mesma causa são encontrados, além das referências citadas no início, em Metha<sup>44</sup> (p.244, acidentes nos Estados Unidos), Cook<sup>16</sup> (p.62, acidentes na Inglaterra) e, obviamente, nas referências dadas pelos próprios autores.

## 2 - ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA E OBJETIVO DO TRABALHO

### 2.1 - Coeficientes

Neste trabalho são obtidos apenas os valores médios das pressões causadas pelo vento. Define-se, a seguir, os coeficientes aerodinâmicos que possibilitam a determinação das forças médias do vento em edificações (ação estática).

#### a) Coeficiente de pressão externa

Por definição, o coeficiente de pressão externa é dado por:

$$c_{pe} = \Delta p_e / q \quad (2.1.1)$$

onde:

$\Delta p_e$ : pressão estática efetiva média no ponto em estudo, na superfície externa da edificação.

$q$ : pressão dinâmica de referência.

Uma vez determinado experimentalmente o coeficiente de pressão externa, pode-se obter a pressão efetiva externa pela relação:

$$\Delta p_e = c_{pe} q \quad (2.1.2)$$

#### b) Coeficiente de pressão interna

Analogamente, para pressão interna se obtém o coeficiente de pressão interna, dado por:

$$c_{pi} = \Delta p_i / q \quad (2.1.3)$$

onde:

$\Delta p_i$ : pressão estática efetiva média no ponto em estudo, na superfície interna da edificação.

c) Coeficiente de pressão

Algebricamente, o coeficiente de pressão  $c_p$  é dado por:

$$c_p = c_{pe} - c_{pi} = (\Delta p_e - \Delta p_i) / q = \Delta p / q \quad (2.1.4)$$

A pressão efetiva  $\Delta p$  será obtida por:

$$\Delta p = c_p q \quad (2.1.5)$$

d) Coeficiente de forma externo

O coeficiente de forma externo, aplicável a uma superfície plana de área A, é definido por:

$$C_e = F_e / (q A) \quad (2.1.6)$$

onde:

$F_e$ : resultante das pressões externas sobre a superfície plana (é uma força perpendicular a esta superfície).

Conforme (2.1.2)

$$F_e = \int_A \Delta p_e dA = \int_A c_{pe} q dA$$

Substituindo na (2.1.6):

$$C_e = \int_A c_{pe} q dA / (q A)$$

$$C_e = (1/A) \int_A c_{pe} dA \quad (2.1.7)$$

Uma vez calculado  $C_e$  pela expressão acima, em um modelo, podemos obter a força normal sobre uma superfície plana de uma edificação real por:

$$F_e = C_e q A \quad (2.1.8)$$

e) Coeficiente de forma interno

Analogamente, obtemos o coeficiente de forma interno:

$$C_i = F_i / (q A) \quad (2.1.9)$$

onde:

$F_i$ : resultante das pressões internas sobre a superfície plana (força perpendicular a esta superfície).

Sendo  $F_i$  dada por:

$$F_i = C_i q A \quad (2.1.10)$$

f) Coeficiente de forma

Obtém-se o coeficiente de forma C por:

$$C = C_e - C_i = (F_e - F_i) / (q A)$$

$$C = F / (q A) \quad (2.1.11)$$

sendo F a força normal total sobre a superfície plana em estudo.

Uma vez conhecido C:

$$F = C q A \quad (2.1.12)$$

g) Quando  $c_{pe}$ ,  $c_{pi}$  ou  $c_p$  são constantes em uma superfície plana, teremos:

$$c_{pe} = C_e ; c_{pi} = C_i ; c_p = C$$

Para um estudo mais aprofundado dos coeficientes aerodinâmicos indica-se a referência 6.

h) Convenção de sinais:

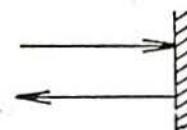
Foi adotada a seguinte convenção de sinais:

-- sobrepressão: coeficientes positivos

(+)

-- sucção: coeficientes negativos

(-)



## 2.2 - Formulação teórica

As pressões no interior de um compartimento, seja ele uma sala de uma edificação com divisões, ou mesmo uma edificação sem divisões internas, são responsáveis pela alteração do carregamento total de suas superfícies limítrofes, às quais dar-se-á o nome de faces. Estas faces podem ser paredes, coberturas, ou mesmo o piso no caso em que este estiver submetido a uma pressão em sua superfície externa. O carregamento total em cada face é dado pela diferença algébrica entre a pressão externa,  $p_e$ , e a pressão interna,  $p_i$ , integrados sobre a face<sup>17</sup>:

$$F = \iint (p_e - p_i) dx dy \quad (2.2.1)$$

Trataremos, neste trabalho, do caso de edificações sem divisões internas; portanto, a P.I. em um compartimento da edificação será designada como a P.I. na edificação.

Esta pressão no interior da edificação é controlada principalmente, no caso de pressões médias, pelo campo de pressões externas sobre a edificação e pelo tipo, tamanho e

localização de aberturas que liguem o exterior ao interior da edificação .

A Fig. 2.1 ilustra, em três situações típicas, como se dá o estabelecimento do fenômeno:

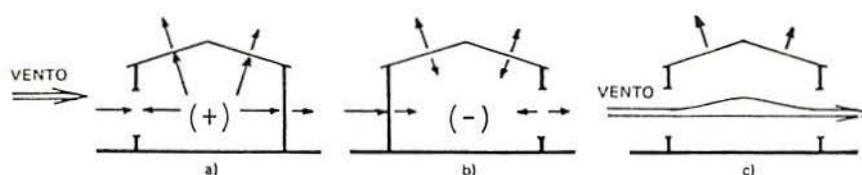


Fig. 2.1 - Influência da localização da(s) abertura(s).

(a) Neste primeiro caso tem-se uma abertura na parede de barlavento, enquanto que as outras faces são impermeáveis. O ar escoia através da abertura até a P.I. se igualar à P.E. na abertura. Esta P.I. positiva irá majorar as ações do vento nas paredes laterais e de sotavento (todas elas submetidas a sucções externas), bem como no telhado (o qual, exceto para inclinações muito altas, está também submetido a sucções). Já na parede de barlavento, o carregamento resultante será muito pequeno, próximo de zero. Este caso representa o que ocorre na maioria dos acidentes devidos à P.I.

(b) Neste segundo caso, a abertura está localizada na parede de sotavento, e a P.I. terá seu valor igualado ao da P.E. nesta abertura. A P.I., agora negativa, causará majoração na parede de barlavento e diminuirá as ações nas paredes laterais e de sotavento, e no telhado (se estiver submetido a sucções).

Consideramos, na explicação destes dois primeiros casos, que existia somente uma abertura e que o resto da edificação era impermeável ao ar. Esta é uma situação limite; quase sempre há algum tipo de permeabilidade disseminada pela edificação, inclusive porque uma construção, para ser habitável, não pode ser estanque ao ar. Além da sufocação dos usuários, a diferença entre a P.I. e a P.E. durante a ocorrência de ventos fortes pode romper alguma parte da construção como portas, janelas, painéis de revestimento de

paredes e cobertura, etc. (Blessmann<sup>12</sup> exemplifica numericamente esta última afirmação).

Os dois primeiros casos valem (quase sempre) também no caso de termos a abertura nas paredes de barlavento ou sotavento considerada como sendo a abertura dominante da edificação (dependendo do conceito de abertura dominante), e as demais faces possuído uma permeabilidade normal.

Surgem daí dois conceitos importantes para o cálculo da P.I.: o de índice de permeabilidade e o de abertura dominante (Ref. 12)

-- O índice de permeabilidade de uma parte da construção é a relação entre a área das aberturas existentes nesta parte e a área total desta parte. Em geral o índice de permeabilidade (ou, simplesmente, permeabilidade) é expresso em porcentagem da área da parte considerada.

Para ter-se uma idéia dos valores do índice de permeabilidade disseminada em construções reais, indica-se, a seguir, resultados de medições em diversos países. Estes valores são para o caso de construções para moradias ou escritórios, com todas as janelas e portas fechadas:

\* Cook<sup>17</sup> indica os seguintes valores (citando as referências):

-- Edifícios para escritórios:

-- Canadá (12 edifícios).....0,036%±0,0046%

-- Estados Unidos (6 edifícios).....0,039%±0,0164%

-- Edifícios para residências:

-- Reino Unido.....0,104%

-- Canadá.....0,038%

-- Suécia.....0,0207%

-- Paredes internas:

-- Holanda.....0,067%±0,015%

\* Newberry e Eaton<sup>46</sup> estabelecem limites: entre 0,01% e 0,1%, ou até mais. Por exemplo: 0,2% para o estudo de "Roxey House" (Ref. 47), na Inglaterra.

\* A norma brasileira NBR-6123<sup>3</sup> dá, como indicação geral, um índice compreendido entre 0,01% e 0,05%.

\* Dalgliesh<sup>20</sup> diz que este índice deve situar-se, aproximadamente, em torno de 0,1% a 0,3%.

\* Stathopoulos<sup>54</sup> indica também diversos valores de permeabilidade (citando as referências) próximos dos valores acima citados.

Na maioria dos casos os valores obtidos são aproximados, pois uma avaliação precisa deste índice é difícil. Esta avaliação deve ser feita com prudência, pois alterações importantes na permeabilidade durante a vida útil da construção, podem levar a carregamentos mais nocivos que os inicialmente previstos.

É de ressaltar ainda que as várias condições climáticas e técnicas de construção em diferentes países (e os estados brasileiros aí se enquadram), obviamente conduzem a uma variedade enorme de valores para o índice de permeabilidade das construções.

-- Uma abertura dominante é uma abertura cuja área "domina" a área das demais aberturas. É definida como sendo a abertura cuja área é N vezes maior que a área total das outras aberturas existentes nas faces da construção, incluindo a cobertura, se houver forro permeável ou na ausência de forro.

A abertura dominante pode ser um conjunto de aberturas situadas todas em uma mesma zona de uma face da construção, zona na qual as pressões são de mesmo sinal. A norma brasileira NBR-6123<sup>9</sup> adota N=1, como também o fazem Surry e outros<sup>58</sup>, e Blessmann<sup>12</sup>. Alguns autores consideram N=2, como por exemplo, Cook<sup>17</sup>.

É importante ressaltar que nem sempre uma abertura dominante chega a definir o sinal da pressão que reinará no interior de uma edificação (dependerá dos valores e sinais das P.E. e do valor de N). É mais correto pensar-se em termos da grande contribuição, para o valor da P.I., que terá a P.E. na abertura dominante.

(c) No caso em que uma abertura não domine sobre as outras a ponto de definir o sinal ou o valor da P.I., ou mesmo de não existir uma abertura dominante, recorre-se ao emprego de uma fórmula para a determinação desta pressão. Este é justamente o caso ilustrado na fig.2.1c, em que se têm duas aberturas de tamanhos aproximadamente iguais localizadas nas paredes de

barlavento e de sotavento. O vento agora passa por dentro da edificação e a P.I. tem um valor intermediário entre os casos (a) e (b).

Encontra-se, na literatura especializada, mais de uma fórmula para o cálculo da P.I. em uma edificação.

A fórmula mais usual é aquela em que o fluxo de ar através de um orifício ou abertura é expresso por uma equação da forma:

$$Q = K A (\Delta p)^n \quad (2.2.2)$$

sendo:

Q : vazão volúmica de ar ( $\rho = \text{cte.}$ ) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

K : coeficiente de vazão [ $\text{m}/\text{s Pa}^{-n}$ ]

A : área do orifício ou abertura [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta p$ : pressão efetiva média no orifício ou abertura

$\Delta p = |\Delta p_e - \Delta p_i|$ , (externa e interna) [Pa]

n : expoente de escoamento [adimensional]

Portanto:

$$Q = K A (|\Delta p_e - \Delta p_i|)^n \quad (2.2.3)$$

Pode-se considerar a vazão volúmica de ar ao invés da vazão de massa porque  $\rho$  (massa específica do ar) pode ser considerado constante no âmbito das velocidades dos ventos naturais, nas proximidades do solo<sup>6</sup>.

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

Há várias fórmulas utilizadas para a determinação da P.I. A maioria dos autores utiliza a fórmula (2.2.3), como já citado. Entretanto, há uma variação nos valores do expoente de escoamento, n.

Kiel, Wilson e Sherman<sup>37</sup> compilaram uma enorme quantidade de dados sobre expoentes de escoamento e coeficientes de vazão, com o intuito de determinar o grau de correlação existente entre estes parâmetros de escoamento. Encontraram que os valores de  $n$  variam entre 0,5 e 1,0 (com média 0,67) tanto para construções ditas "impermeáveis" como para construções com vazamentos nítidos de ar. Isto demonstra, segundo os autores, que os parâmetros de escoamento são mais dependentes da qualidade da construção, do que de seu tipo aparente.

Apesar disso, três são os valores de  $n$  mais utilizados, conforme será discutido no final deste item.

Para o coeficiente de vazão,  $K$ , a disparidade é ainda maior. Além de apresentar uma gama de variações muito grande de uma edificação para outra, é obtido a partir da fixação de um determinado expoente de escoamento. O valor de  $K$  varia com a posição da passagem de ar e depende da forma e das condições do orifício.

Shaw<sup>53</sup> obteve experimentalmente, em edificações reais, os seguintes valores para  $K$ , considerando  $n = 0,65$ :

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

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

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

Deve-se citar também os ótimos trabalhos de Aynsley<sup>4,5</sup> estudando problemas de ventilação natural em modelos de edificações. Neles são dados valores de coeficientes de vazão adimensionais, a partir de uma fórmula padrão do tipo  $Q = K A V$  ( $V$  = velocidade média do vento através da abertura de área  $A$ ).

Mais recente é o trabalho de Vickery e Karakatsanis<sup>62</sup> em um estudo experimental em túnel de vento sobre as características da vazão através de aberturas em edificações e a dependência destas características do escoamento tangencial externo.

Devido a esta enorme variação, o que se faz na prática é considerar  $K$  constante, fazendo com que o expoente  $n$  represente o efeito dos diversos tipos de abertura e escoamento através das mesmas.

De acordo com (2.2.3) a vazão volúmica de ar pode ser expressa em uma zona  $j$  da construção, por:

$$Q_j = \pm K A_j (|\Delta p_e - \Delta p_i|)^n \quad (2.2.4)$$

onde:

- $A_j$ : soma das áreas dos pequenos orifícios e/ou fendas existentes em uma zona  $j$  da construção para a qual possa ser considerado um  $\Delta p_e$  médio, representativo das pressões externas nesta zona, a qual pode ser uma face inteira da construção;
- $\pm$ : os sinais são necessários para distinguir entre ar que entra (+) e ar que sai (-) da edificação.

Sob condições de regime permanente, o ar que entra na edificação deve ser igual ao ar que sai da mesma (equação da continuidade). Então, considerando, como é usual,  $K$  constante em toda a edificação, tem-se:

$$\sum_{j=1}^N Q_j = \sum_{j=1}^N [\pm A_j (|\Delta p_{e,j} - \Delta p_i|)^n] = 0 \quad (2.2.5)$$

sendo:

- $N$ : número de zonas em que foi dividida a superfície externa da construção, cada uma delas com um  $\Delta p_{e,j}$  representativo das pressões atuantes nesta zona (ou face, se assim puder ser considerada).

Quando a pressão dinâmica de referência,  $q$ , for única ou assim puder ser considerada, pode-se expressar as pressões externas e internas na forma de coeficientes:

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

A (2.2.5) fica:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (|c_{pe,j} - c_{pi}|)^n] = 0 \quad (2.2.6)$$

uma vez que  $q^n$  permanece constante para todos os valores de  $j$ .

As simplificações conduzem a uma fórmula que pode facilmente ser resolvida por um método iterativo, através de técnicas numéricas. Uma vez adotado o expoente  $n$  adequado, a incógnita se torna o coeficiente de pressão interna, já que  $A_j$  é um dado da edificação e  $c_{pe,j}$  pode facilmente ser encontrado nas normas pertinentes.

Percebe-se que este procedimento admite um valor constante para a P.I. na edificação. Isto foi confirmado experimentalmente, ao menos para edificações baixas, conforme descrito nas Refs. 57, 31 e 61. Nesta última, Vickery, Davenport e Surry dizem que a velocidade de transmissão das ondas de pressão (em torno de 350 m/s) é alta, e as velocidades internas de escoamento baixas, comparadas à velocidade externa do vento. Desta forma a variação espacial da P.I. em uma edificação de proporções normais é insignificante, sendo de interesse somente variações temporais da P.I. (o que não será estudado neste trabalho). Os limites de validade desta afirmação não são exatamente estabelecidos.

O maior problema é que considera-se, para o cálculo da P.I., os coeficientes de pressão externa, ou de forma externa ( $C_e$ ), nas superfícies das aberturas, obtidos em edificações fechadas. Desta forma, pode-se ter um índice de permeabilidade da edificação até o limite em que este não altere o campo de pressões externas que existe na mesma edificação fechada. A determinação deste limite deve ser feita com prudência, pois um mesmo valor pode valer em um caso e não valer em outro. Exemplifica-se com a Fig. 2.2.

Na Fig. 2.2a temos um portão com área igual a  $X \text{ m}^2$  na parede de barlavento, bem centrado. Mesmo sendo grande esta abertura, não irá causar alteração sensível no campo de pressões externas, pois o ar preso no interior da construção fará o papel de uma suposta parede naquele local, não alterando sensivelmente o campo de pressões em relação à construção fechada.

Já no caso da Fig. 2.2b temos duas aberturas localizadas muito próximo das quinas da parede de barlavento e da parede lateral. A soma das áreas destas aberturas é igual ao valor da área da abertura na figura (a). Mesmo que o índice de permeabilidade da parede de barlavento seja menor neste caso,

há nitidamente uma alteração no campo de pressões externas na semi-parte direita da edificação. Neste caso, não se poderiam utilizar os coeficientes de pressão, obtidos nas normas, para edificações fechadas.

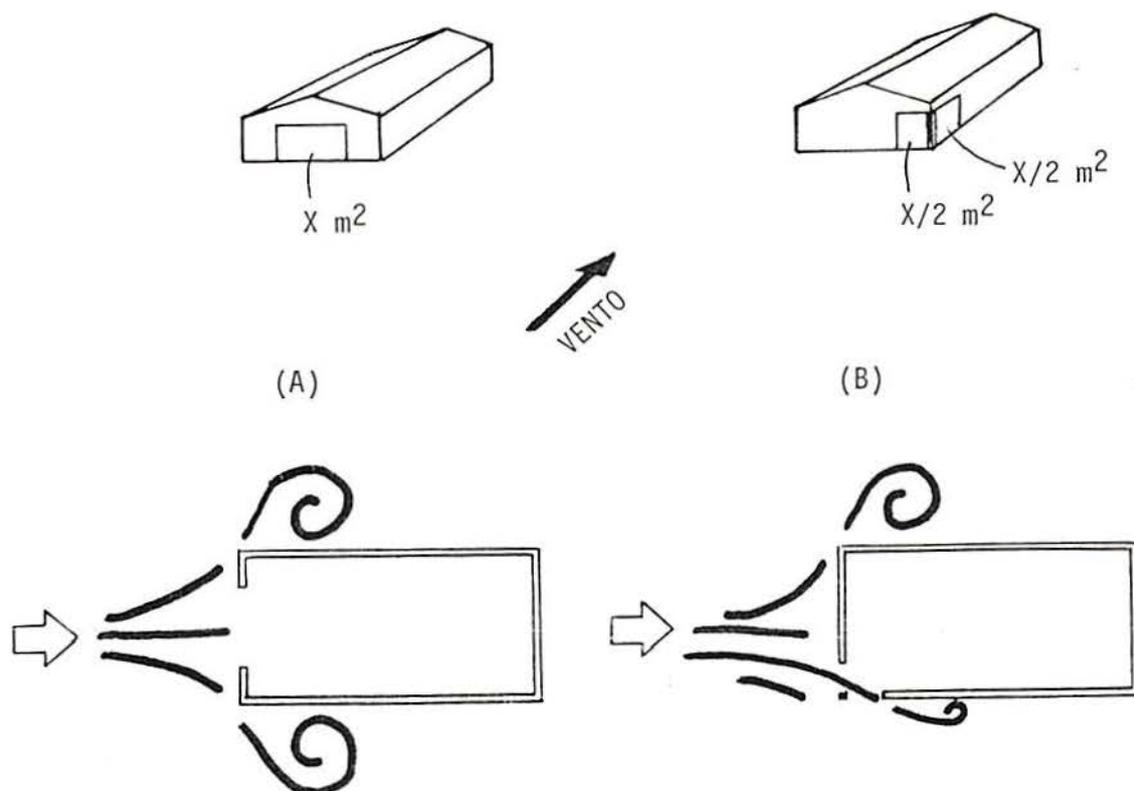


Fig. 2.2 - Influência da localização e tamanho da(s) abertura(s) no campo de pressões externas.

A norma brasileira<sup>3</sup> indica como valor limite para utilização da fórmula um índice de permeabilidade das paredes ou águas da cobertura de 30%, um valor que, conforme visto acima, pode ser perigoso ou seguro, conforme o caso.

Kandola<sup>36</sup> e Stathopoulos et al.<sup>57</sup>, baseados em estudos em modelos ensaiados em túnel de vento, afirmam que pequenas permeabilidades (até 1 a 3%) exercem uma influência insignificante sobre as pressões externas em edificações.

Holdφ et al.<sup>30</sup> estabelecem como limites os seguintes valores: para permeabilidade uniformemente distribuída, 3,00% da área total da edificação; para aberturas normais isoladas, 0,75% da área total. Afirmam os autores que, a partir destes valores, já são observadas alterações no campo de pressões externas sobre a edificação.

Mackey (citado por Stathopoulos e Kozutsky<sup>55</sup>) em estudos em construções reais, constatou que existe um decréscimo das pressões de sotavento, quando há um aumento da permeabilidade (as pressões de barlavento são pouco afetadas).

A conclusões semelhantes, mas em estudos sobre telhados permeáveis, chegaram Cheung e Melbourne<sup>15</sup>, Amano, Fujii e Tazaki<sup>1</sup>, e Kramer e Gerhardt<sup>38</sup>. Concluem os autores que as forças na cobertura são diminuídas com o aumento da permeabilidade do telhado.

Outro trabalho extremamente interessante é o de Robertson, Hoxey e Moran<sup>49</sup> que estudaram os efeitos de bloqueio interno causado pela colocação de objetos de armazenagem (caixas, feno, etc.) sobre o campo aerodinâmico em torno da cobertura de dois celeiros com duas águas isoladas (construção real).

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

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (| C_{e,j} - C_i |)^n] = 0 \quad (2.2.7)$$

Para completar a discussão sobre o valor do expoente de escoamento,  $n$ , são apresentados a seguir os valores mais utilizados: 0,5, 0,65 e 1,0.

(a)  $n = 0,5$ : Este é o valor mais "clássico" do expoente de escoamento. É o valor que vem sendo utilizado há mais tempo. Utilizam ou utilizaram este valor Irminger e Nøkkentved<sup>32</sup>, Dick (citado por Sexton<sup>52</sup>), Pris<sup>48</sup>, Blessmann<sup>12</sup>, Cook<sup>17</sup>, a NBR-6123<sup>3</sup>, Newberry e Eaton<sup>46</sup>, além da publicação **Digest 105**, do Building Research Station<sup>14</sup> que apresenta um cálculo utilizando  $n=0,5$ , ou seja, a raiz quadrada do módulo da diferença entre  $C_e$  e  $C_i$ . A fórmula fica então:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (| C_{e,j} - C_i |)^{0,5}] = 0 \quad (2.2.8)$$

Alguns autores justificam o emprego de  $n=0,5$  como sendo o valor limite que conduz a um carregamento mais nocivo<sup>17</sup>, sendo, por isto, preferível para o cálculo. Será mostrado no capítulo 5 (análise e discussão dos resultados) que isto nem sempre é verdade.

(b)  $n = 0,65$ : é um valor mais sensato, pois evita os perigos dos extremos (medidas em construções reais indicam valores entre 0,5 e 0,8). Sugerem seu uso: Dalglish<sup>19</sup>, Stathopoulos e Kozutsky<sup>55</sup>, Shaw<sup>59</sup>, além de citado em vários trabalhos, conforme Cook<sup>17</sup>, como sendo um valor mais real, inclusive por Davenport<sup>22</sup>. A fórmula fica então:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (| C_{e,j} - C_i |)^{0,65}] = 0 \quad (2.2.9)$$

(c)  $n = 1,0$ : Este é o valor sugerido por Davenport (Refs. 21, 22 e 23). Ele simplifica o problema considerando que a variação de K é tão grande de construção para construção (mesmo seus valores médios), que uma lei mais simples, linear, não irá causar um erro significativo na determinação do coeficiente de P.I. Também utilizam este valor Mattingly e Peters<sup>43</sup>. A fórmula fica então:

$$\sum_{j=1}^N [\pm A_j (| C_{e,j} - C_i |)] = 0 \quad (2.2.10)$$

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N A_j C_{e,j}}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (2.2.11)$$

Ou seja, nada mais é do que fazer a média ponderada das pressões externas em relação às áreas das aberturas, considerando os valores algébricos dos termos do somatório. Esta simplificação elimina a necessidade de um cálculo iterativo.

Para finalizar, há ainda as fórmulas similares sugeridas por Liu e Saathoff (Refs. 40, 42, e 50) para o caso de edificações com apenas duas aberturas:

$$c_{pi} = [c_{p2} + c_{p1} (A_1/A_2)^2] / [1 + (A_1/A_2)^2] \quad (2.2.12)$$

onde  $c_{p1}$  e  $A_1$  são referentes à abertura por onde entra o ar;  $c_{p2}$  e  $A_2$  são referentes à abertura por onde o ar sai.

E por Holmes<sup>31</sup>:

$$c_{pi} = \Delta p_i / q = c_{pB} / [1 + (A_S/A_B)^2] + c_{pS} / [1 + (A_B/A_S)^2] \quad (2.2.13)$$

onde  $c_{pB}$  e  $c_{pS}$  são os coeficientes de pressão externa nas aberturas de barlavento e de sotavento, respectivamente.  $A_B$  e  $A_S$  são as áreas das aberturas de barlavento e de sotavento.

### 2.3 - Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é, utilizando a fórmula mais usual do tipo  $Q = K A (\Delta p)^n$ , encontrar um valor de  $n$  que melhor represente as condições de carregamento, devido à P.I., em pavilhões industriais e edificações afins. O coeficiente de vazão é considerado constante e  $n$  pretende representar o efeito combinado dos tipos de abertura e escoamento através das mesmas.

Além disso, também verificar a validade do uso dos coeficientes de pressão externa para edificações fechadas, nas fórmulas para o cálculo do coeficiente de P.I.

### 3 - CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS

#### 3.1 - Objetivo dos ensaios

Os ensaios tiveram como finalidade:

a) Verificar a validade da utilização de coeficientes aerodinâmicos externos obtidos em modelos fechados, de maneira semelhante aos indicados na NBR-6123, para sua utilização em fórmulas para o cálculo da P.I. em edificações normais.

b) Medir a pressão no interior do modelo de pavilhão industrial, para uma série de combinações de tipos de abertura com diversos tamanhos e posições. O vento incide de três ângulos diferentes para cada tipo de combinação. Esquemas detalhando o tipo e posicionamento de cada abertura são mostrados nos itens 3.2.2 e 4.1.4, na descrição do modelo de P.I. e dos ensaios. Estas medições de pressão visaram a verificação da validade do emprego da fórmula mais usual para o cálculo da P.I.,  $Q = K A (\Delta p)^n$ , para estimar a real P.I. em uma edificação.

c) Verificar a capacidade de vedação de diversos tipos de fitas adesivas, para emprego no fechamento de frestas e/ou aberturas de modelos.

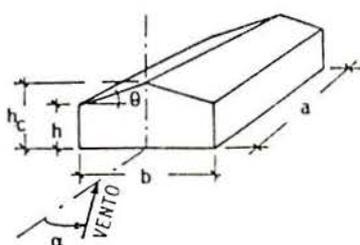
#### 3.2 - Modelos ensaiados

Foram ensaiados dois modelos de um mesmo pavilhão industrial. O primeiro foi para medição das pressões no exterior do pavilhão e o segundo, para medição das pressões no interior do mesmo.

As dimensões externas e proporções dos dois modelos são dadas na tabela 3.1, obedecida a seguinte simbologia:

- dimensões em planta:  $a \times b$  ( $a > b$ );
- altura das paredes retangulares:  $h$ ;
- altura da cumeeira:  $h_c$ ;
- inclinação do telhado:  $\theta$ ;
- ângulo de incidência do vento:  $\alpha$ .

Estas características são ilustradas na figura 3.1.



dimensões [mm]	proporções
$a = 400$	$a \times b \times h$
$b = 200$	$2 \times 1 \times 0,25$
$h = 50$	
$h_c = 71,3$	$\theta = 12^\circ$

Fig 3.1 e Tab. 3.1 - Características geométricas do modelo de pavilhão industrial.

Os modelos foram construídos sobre bases retangulares de madeira de 13mm de espessura e dimensões em planta de 500 x 700mm. As bordas são arredondadas em forma de elipse. Um esquema é mostrado na Fig. 3.2.

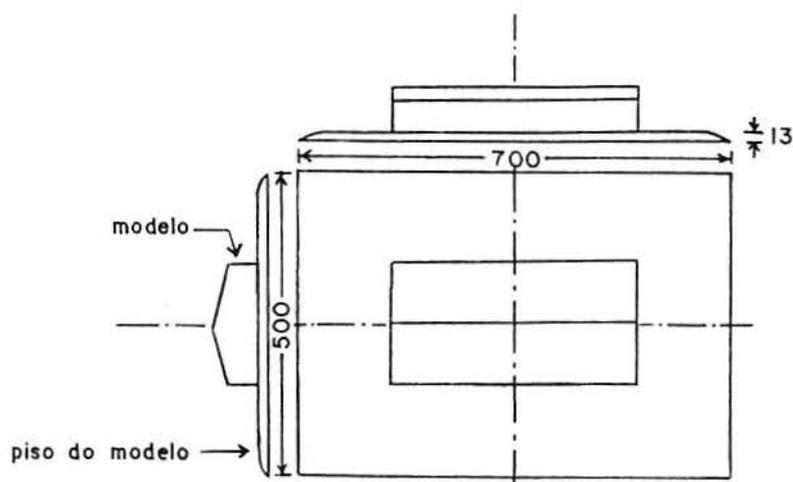


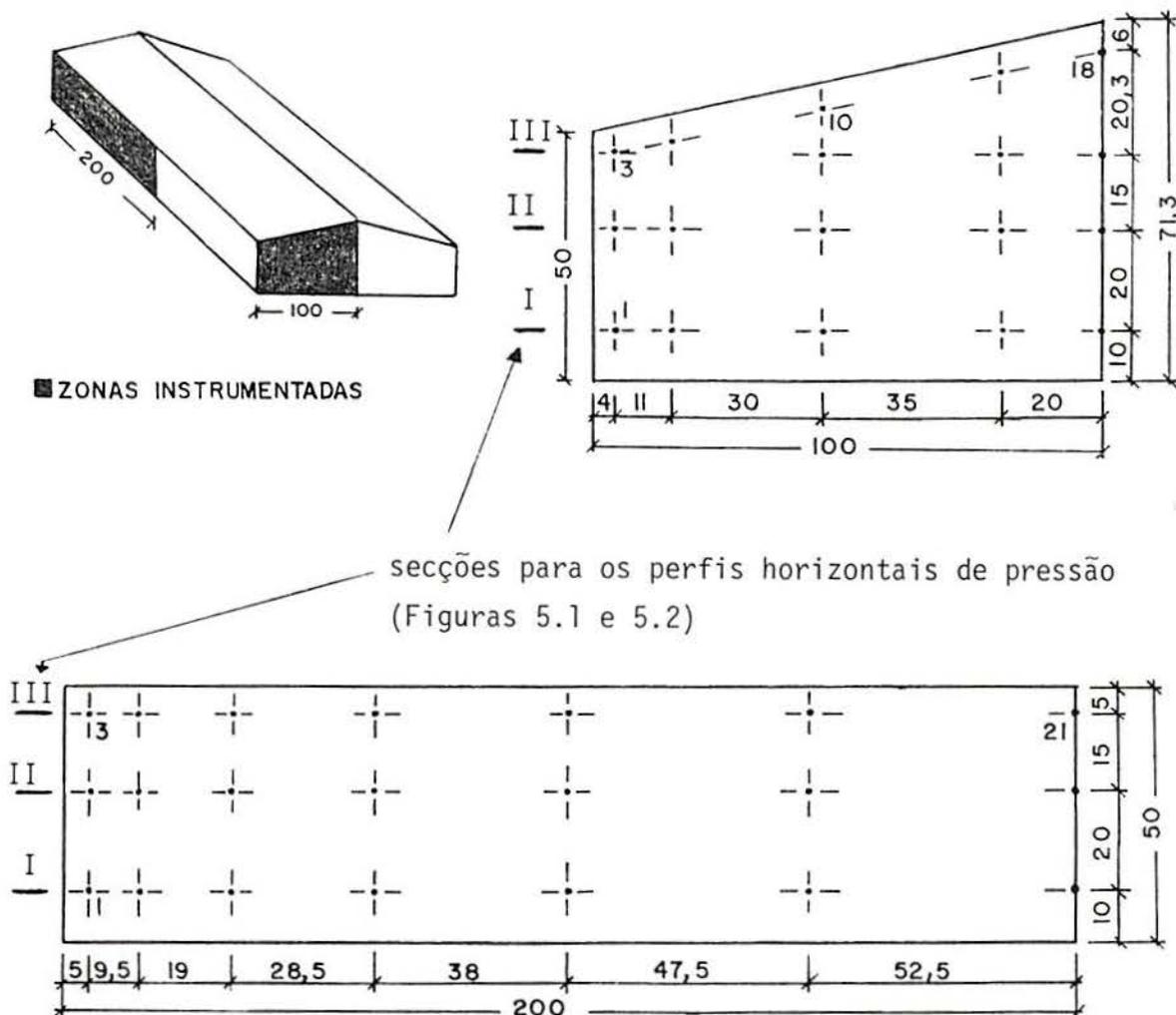
Fig. 3.2 - Base dos modelos (piso). (Dimensões em mm).

Detalhadamente, os modelos são descritos a seguir:

### 3.2.1 - Modelo de pressão externa

O modelo para determinação das P.E. foi construído em madeira, exceto a cobertura, feita em alumínio.

As paredes foram instrumentadas por quadrantes, devido a simetria do modelo, facilitando assim sua construção. A localização destes quadrantes é indicada na Fig. 3.3. Esta mesma figura mostra também a localização das 18 tomadas de pressão estática da parede do oitão, e das 21 tomadas da parede lateral. Estas tomadas foram feitas com furos de 1,5mm de diâmetro onde foram fixadas diretamente mangueiras plásticas de 1mm de diâmetro interno, e com cerca de 1,30m de comprimento.



Dimensões em mm

Fig. 3.3 - Localização dos quadrantes instrumentados, das tomadas externas de pressão estática e das seções para os perfis horizontais de pressão.

A Fig. 3.4 mostra uma fotografia do modelo.

### 3.2.2 - Modelo de pressão interna

O modelo para medição da P.I. foi quase totalmente feito de alumínio, exceto pequenos apoios internos de madeira, que servem para fixação das placas de alumínio, nas quais foram feitas as aberturas. Estas constituem-se de três tipos básicos, com variações em suas áreas e formas, que são: (a) aberturas tipo portão e janela, (b) permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares, e (c) um tipo intermediário imitando janelas tipo basculante. Este último apenas nos oitões, sendo que os dois primeiros tanto nos oitões como nas paredes laterais.

Alguns dados sobre as aberturas aparecem na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características das aberturas.

(1)	(2)	(3)	(4)
A	10,00%	1	1200
	5,00%	1/2	600
	2,50%	1/4	300
	1,25%	1/8	150
B	3,00%	1/2	600
	1,50%	1/4	300
	0,75%	1/8	150

- (1) Localização das aberturas. A: oitão B: paredes laterais.  
 (2) Percentagem das aberturas em relação à área das paredes onde estão localizadas.  
 (3) Proporção em relação à maior abertura do oitão.  
 (4) Área das aberturas do modelo em mm<sup>2</sup>.

Os tipos (a), (b) e (c) citados acima são ilustrados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7. Uma fotografia do conjunto das placas utilizadas é mostrado na figura 3.8, e duas fotografias do modelo na figura 3.9.

Estas aberturas foram feitas em chapas retangulares de alumínio, com 1mm de espessura, fixadas em apoios internos feitos de madeira, através de pedaços de velcro. Isto permitia

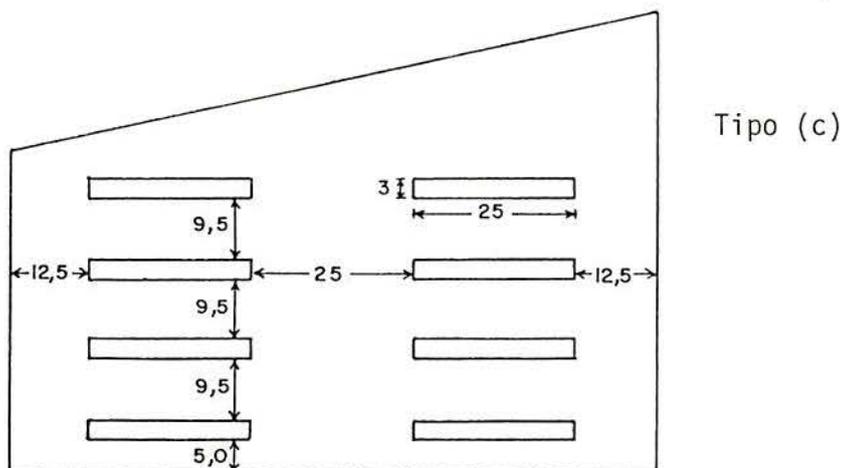
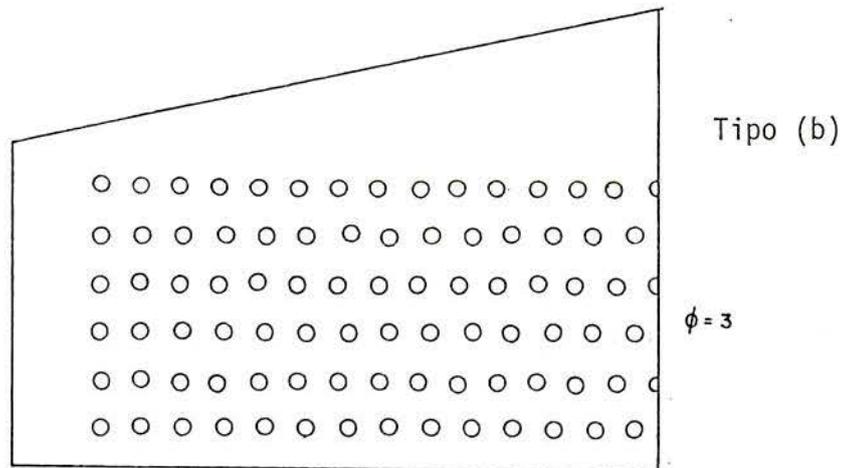
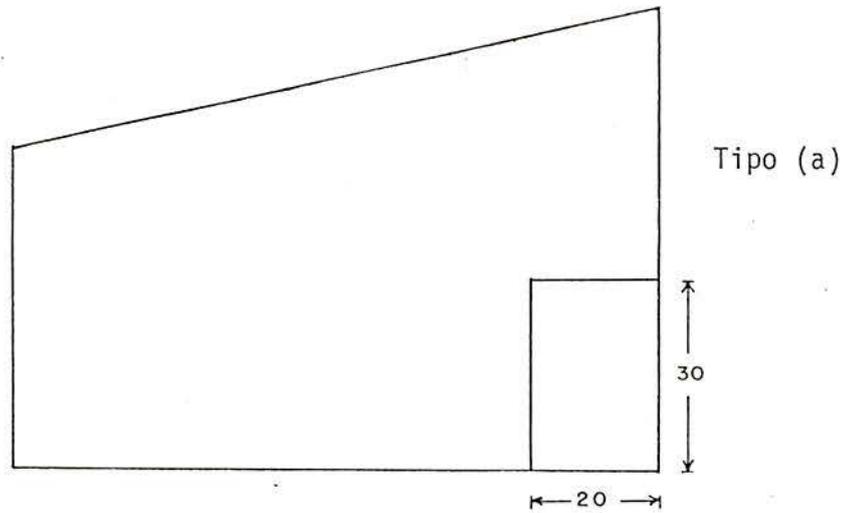


Fig. 3.5 - Dimensões, em mm, das maiores aberturas do oitão para os três tipos básicos de abertura. Devido à simetria, representa-se somente a meia secção do oitão.

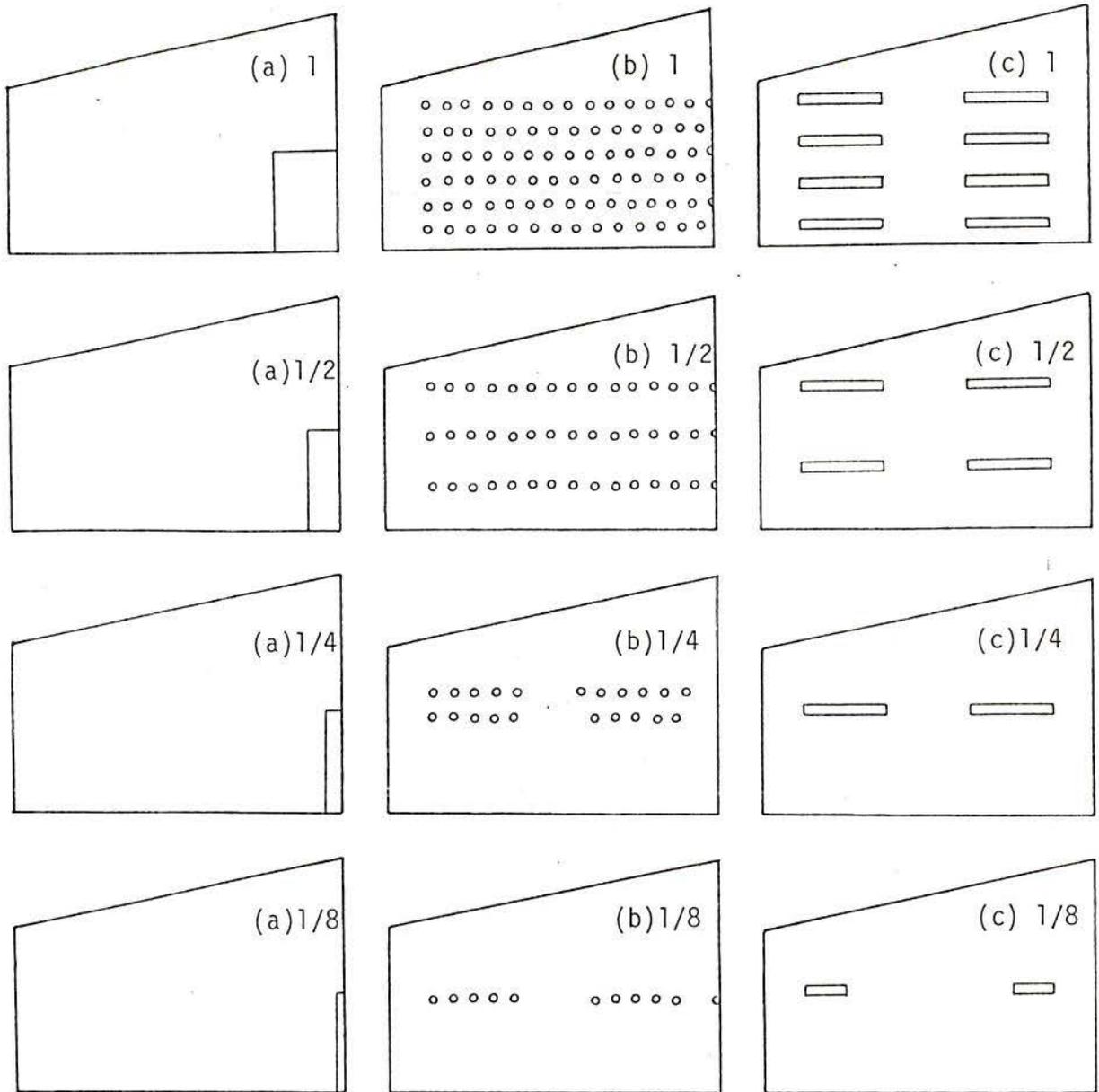


Fig. 3.6 - Proporções em relação à maior abertura do oitão para os três tipos básicos de abertura: (a), (b) e (c).

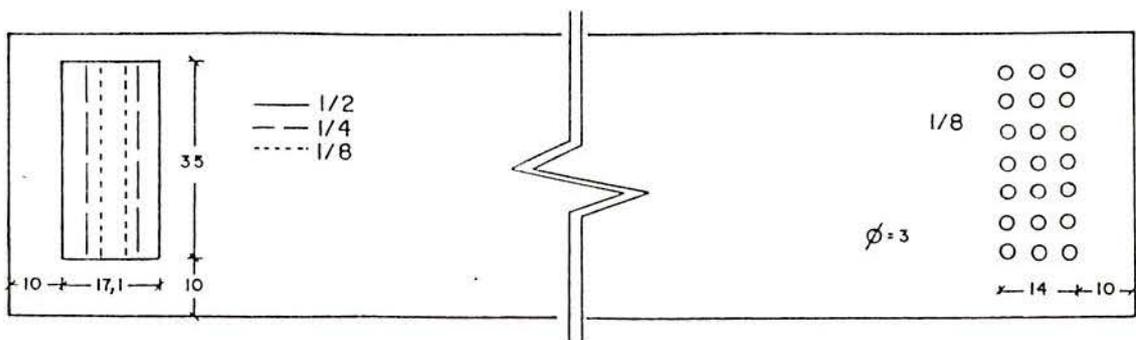


Fig. 3.7 - Proporções em relação à maior abertura do oitão e dimensões, em mm, das aberturas das paredes laterais (tipos (a) e (b)).

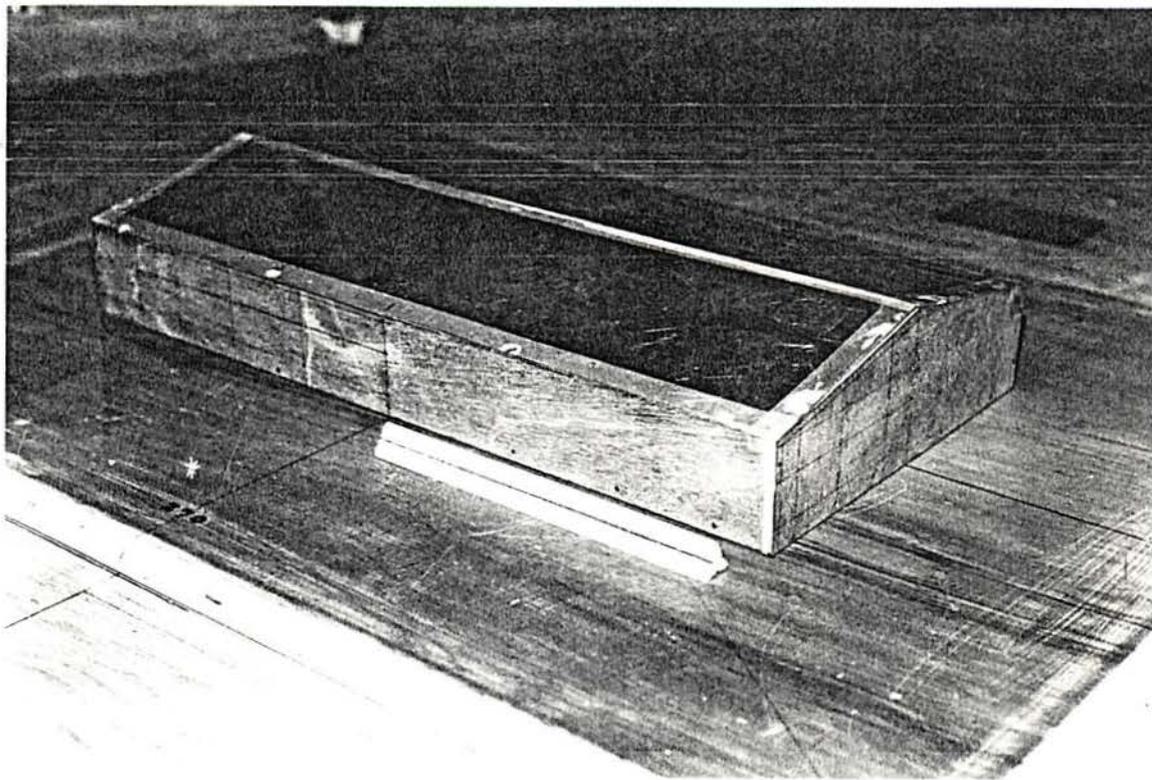


Fig. 3.4 - Modelo para medição das pressões externas

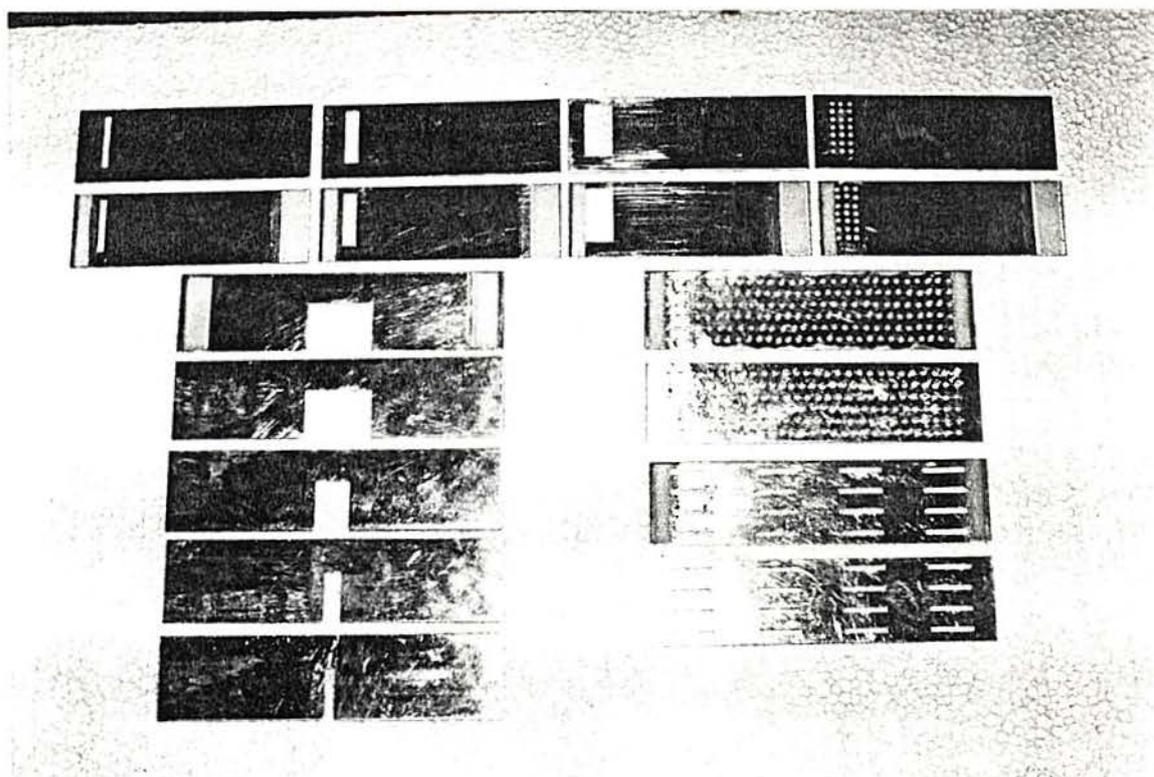


Fig. 3.8 - Placas de alumínio com os diversos tipos de abertura

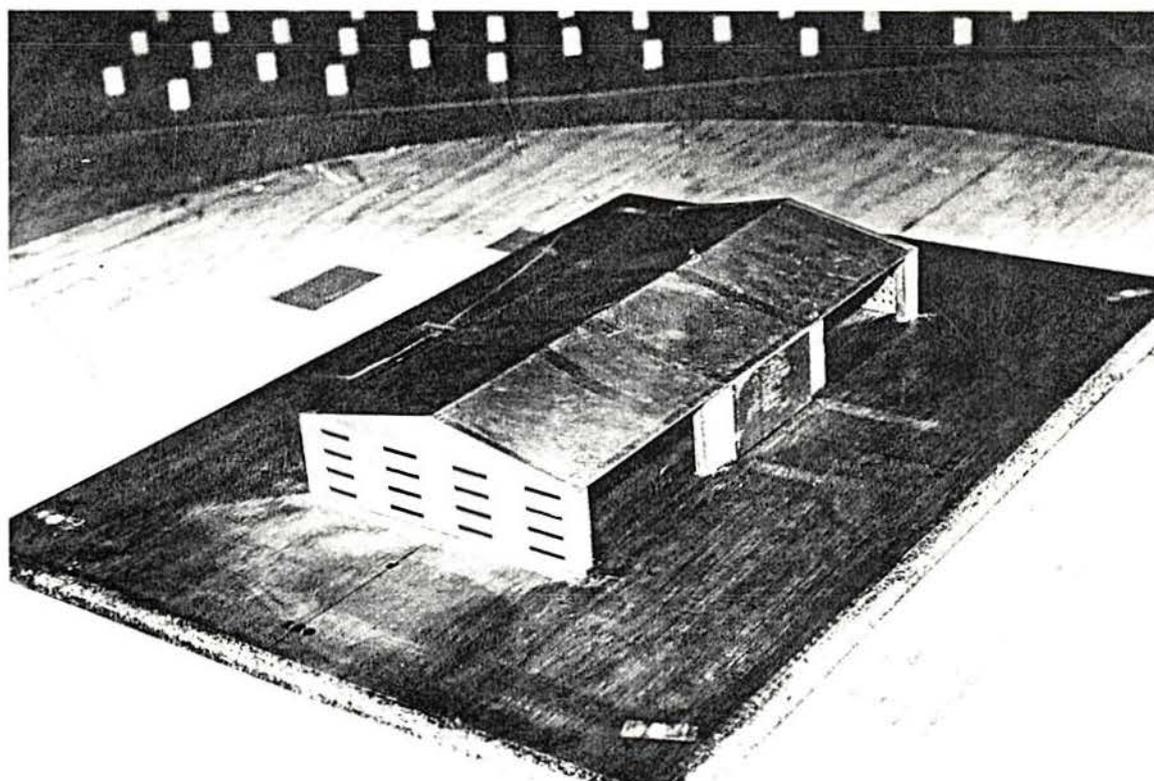
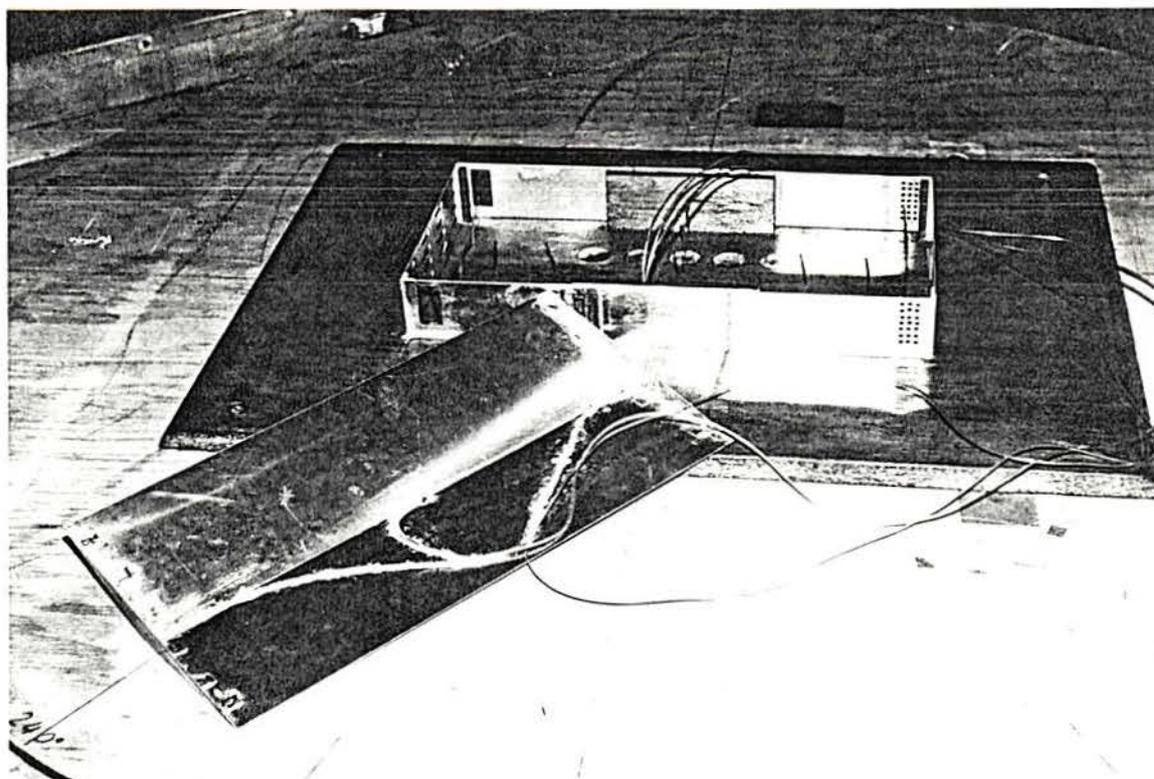


Fig. 3 9 - Fotografias do modelo para medição da pressão interna.

a colocação e retirada das chapas e, conseqüentemente, a troca dos diversos tipos de aberturas, de uma maneira extremamente fácil, sem necessidade de parafusos. A fixação era completada pela colocação de fita adesiva em torno das frestas de todo o modelo, inclusive na ligação das paredes com a base. A colocação da fita adesiva teve duas finalidades: a primeira, já citada, de ajuda na fixação do modelo, aliada à fixação dada pelo velcro; a segunda, que será discutida no capítulo 4 (Ensaio), tem o objetivo de promover a vedação das possíveis frestas existentes entre as zonas limítrofes das placas.

### **Instrumentação interna:**

O modelo foi instrumentado internamente com tomadas de pressão semelhantes às tomadas externas, com exceção das 3 tomadas da cobertura. A localização das tomadas de P.I. é mostrada na Fig.3.10.

Foram colocadas 19 tomadas de pressão no piso do modelo, o que facilitou enormemente sua instrumentação. Esta idéia é de Holmes<sup>31</sup>, que utilizou apenas uma tomada de P.I. no piso de um modelo, em seu mais citado trabalho sobre P.I. Nas paredes laterais foram colocadas duas tomadas, e na cobertura mais três tomadas de pressão estática.

As três tomadas da cobertura foram feitas fixando-se mangueiras plásticas lateralmente sobre a superfície em que se queria medir a pressão, e furando-se lateralmente a mangueira.

Não foi constatada diferença em termos da eficiência dos dois tipos de tomada utilizadas internamente.

## **3.3 - Equipamento**

### **3.3.1 - Túnel de vento**

Os ensaios foram realizados na mesa M-II do túnel de vento TV-2 da UFRGS (Fig. 3.11). Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais, simulação esta necessária para que sejam obtidos resultados compatíveis com a realidade. A relação 'comprimento/altura' da câmara de ensaios é de 10,3. As dimensões da secção transversal desta

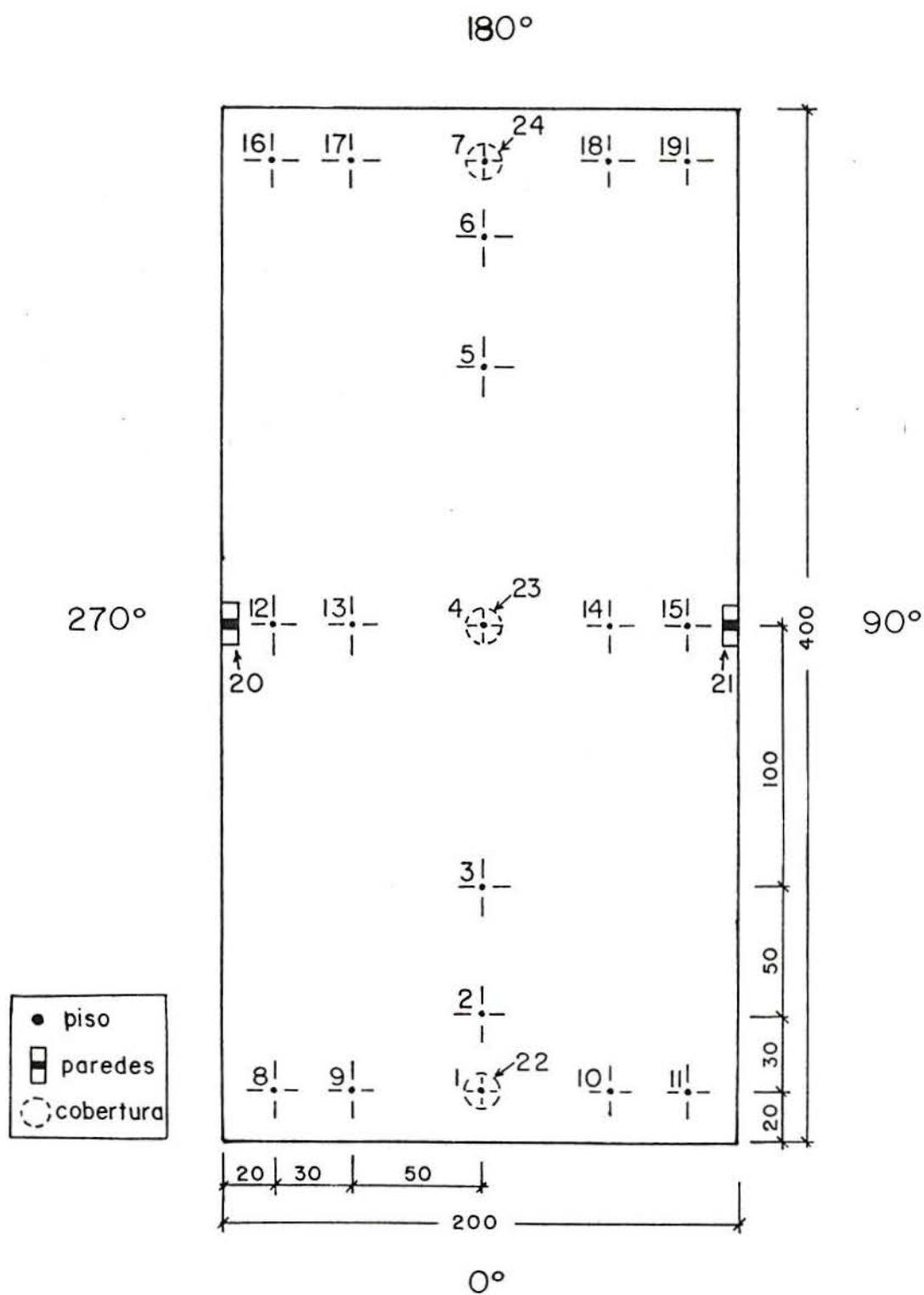


Fig. 3.10 - Localização das tomadas de P.I.

câmara variam linearmente entre  $1200 \times 900\text{mm}$  na entrada, e  $1300 \times 900\text{mm}$ , na saída (a altura da câmara de ensaios é de  $900\text{mm}$ ).

A velocidade máxima do fluxo de ar, com vento uniforme e suave, sem obstruções, é de  $42\text{m/s}$  ( $150\text{km/h}$ ). Para simulação do vento natural são colocados alguns dispositivos na entrada e no piso da câmara de ensaios. Para o tipo de vento simulado neste trabalho, foram utilizados os seguintes dispositivos: anteparos triangulares perfurados, uma placa perfurada transversal (ambos no início da câmara de ensaios) e blocos paralelepípedicos com  $30\text{mm}$  de altura e base de  $20 \times 20\text{mm}$ , distribuídos em quincôncio ao longo do piso da câmara de ensaios.

Para uma descrição mais completa e maiores detalhes do TV-2, consultar Blessmann<sup>6,13</sup>.

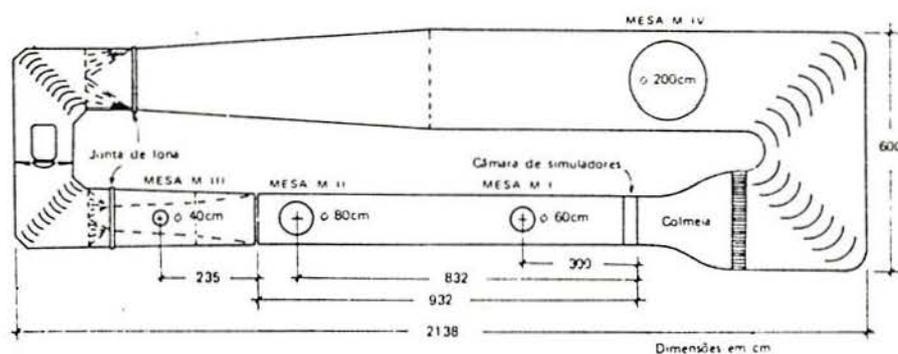


Fig. 3.11 - Circuito aerodinâmico do túnel de vento TV-2 da UFRGS.

### 3.3.2 - Aparelhagem

#### (a) Manômetros

Foram utilizados dois tipos de manômetros. Um micro-manômetro tipo Betz para determinação da pressão estática de referência e da velocidade do vento, e um multimanômetro a álcool para determinação das pressões estáticas médias nas tomadas dos modelos.

O multimanômetro a álcool é constituído de tubos de vidro de diâmetro externo de 7mm e interno de 5mm, conectados pela parte inferior a um depósito contendo álcool tingido de preto.

#### (b) Registro fotográfico

Como o multimanômetro a álcool fornece uma imagem simultânea de todas as pressões medidas para uma determinada incidência do vento, pode-se fazer o registro das mesmas através de fotografias "instantâneas" do multimanômetro. Isto foi feito utilizando-se uma máquina fotográfica, reflex, de 35mm.

#### (c) Barômetro e Termômetro

Foram utilizados, também para o cálculo da velocidade do vento, um barômetro metálico e um termômetro de mercúrio que forneciam, respectivamente, a pressão atmosférica e a temperatura no interior do túnel.

## 4 - ENSAIOS

### 4.1 - Descrição dos ensaios

A rotina geral dos ensaios, tanto para o modelo de P.E., como para o modelo de P.I., é a seguinte:

#### 4.1.1 - Pressão dinâmica e velocidade

Inicialmente determina-se a velocidade do vento na secção onde serão realizados os ensaios (neste caso, a mesa M-II do TV-2), que vem a ser, por definição, a velocidade ao longe, no escoamento não perturbado pelo modelo. Um tubo Pitot é colocado nos pontos onde se deseja medir a velocidade na secção sem o modelo, pois este altera a velocidade em suas proximidades e o tubo Pitot não mais indicaria a velocidade ao longe. Relaciona-se então esta velocidade medida sem o modelo, com a diferença de pressão nos anéis piezométricos,  $\Delta p_A$ , a qual é uma função da vazão; os anéis estão situados em uma região bem a montante do modelo, não sendo praticamente influenciados pelo bloqueio causado pelo mesmo. Desta forma, mesmo depois de colocado o modelo,  $\Delta p_A$  permite o cálculo da velocidade ao longe pela medida (indireta) da vazão de ar no convergente.

Os anéis são ligados a um dos micro-manômetros tipo Betz, obtendo-se nele  $\Delta p_A$ . O tubo de Pitot é ligado a outro micro-manômetro tipo Betz que fornece a pressão dinâmica  $q$ . Para cada ponto e velocidade desejados são medidos os valores de  $\Delta p_A$  e  $q$ , e relacionados por um coeficiente  $k$ .

Tem-se então:

$$k = q / \Delta p_A$$

sendo:

$q$  : pressão dinâmica no ponto em que se encontra o tubo Pitot.

$\Delta p_{\Delta}$  : diferença de pressões estáticas entre os anéis piezométricos.

A velocidade média do vento em uma cota  $x_3$  pode ser expressa por:

$$V(x_3) = \sqrt{2 q(x_3) / \rho}$$

onde

$$q = k \Delta p_{\Delta} \quad [N/m^2]$$

$$e \quad \rho = \rho_0 T_0 p_a / T p_0$$

$$\rho_0 \text{ (a } 15^\circ\text{C)} = 1,2249 \text{ kg/m}^3$$

$$T_0 = 15^\circ\text{C} = 288,2 \text{ K}$$

$$p_0 \text{ (a } 15^\circ\text{C)} = 760 \text{ mmHg} = 1013,25 \text{ mb} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T = 273,2 + t(^{\circ}\text{C}) \quad [\text{K}]$$

então:

$$\rho = 0,4645 p_a / T$$

e

$$V(x_3) = \sqrt{2 q(x_3) (273,2+t) / 0,4645 p_a} \quad [\text{m/s}]$$

#### 4.1.2 - Pressão estática de referência

Não é a pressão absoluta que se mede, mas sim a diferença  $\Delta p$  entre a pressão estática em um ponto da superfície do modelo e a pressão estática a barlavento do mesmo, na corrente não perturbada por sua presença.

Como no momento do ensaio não é possível medir a pressão estática diretamente no local onde se encontra o modelo, o que se faz é relacionar a pressão estática ao longe (que é dada na tomada de pressão estática do tubo de Pitot, colocado na secção de ensaio, sem modelo), com a pressão estática no segundo anel piezométrico, situado na secção mais estrangulada do convergente. Esta diferença de pressões é justamente a correção a ser feita posteriormente, no cálculo dos coeficientes de pressão, ao tomar-se, no momento dos

ensaios, a pressão estática no segundo anel como a pressão de referência.

Para efeitos de controle, também relaciona-se a pressão dada no Pitot com a pressão em uma das tomadas de pressão estática que se encontram em uma das paredes laterais do túnel.

#### 4.1.3 - Montagem

A base retangular de madeira, sobre a qual foram montados os modelos, foi fixada em uma plataforma circular de 1290mm de diâmetro e bordas biseladas. A plataforma foi colocada a 45mm do piso do túnel, fazendo com que o topo do modelo estivesse a uma altura de 129,3mm.

A colocação da plataforma tinha por finalidade evitar a camada limite formada no piso do túnel para ensaios com vento uniforme e suave; além disso, o que acontece é que as características do vento simulado (turbulento e deslizante) não são bem definidas (não coincidem exatamente com os perfis teóricos) na zona muito próxima ao piso do túnel, que é justamente onde estão localizadas as aberturas, por ter o modelo pequenas dimensões. Por esta razão preferiu-se levantar um pouco o modelo e expô-lo já a um perfil bem de acordo com o teórico, mas sem alterar seu efeito como modelo, ou seja, simulando efetivamente uma situação real.

Um esquema mostrando a montagem do modelo e plataforma é mostrado na figura 4.1.

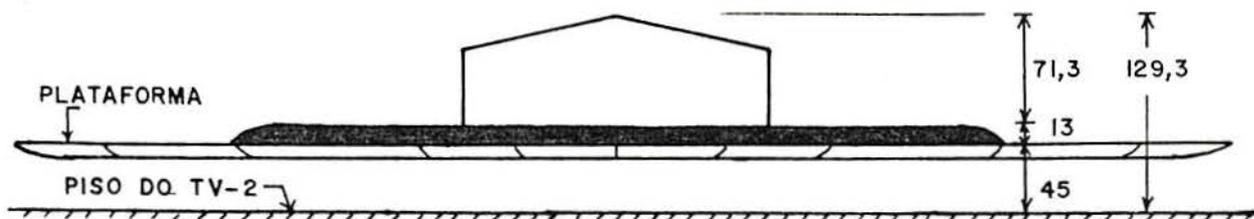


Fig. 4.1 - Montagem dos modelos no TV-2. (Dimensões em mm).

Uma vez montado o modelo no túnel de vento, e convenientemente verificadas cotas e dimensões, eram ligadas as mangueiras plásticas do modelo ao multimanômetro. Estas mangueiras (descritas em 3.2.1), cujos extremos dentro dos modelos constituíam as tomadas de pressão, foram ligadas a outras com cerca de 5m de comprimento e diâmetro interno de 2mm, conectadas aos tubos de vidro de diâmetro interno de 5mm de um multimanômetro a álcool (3.3.2).

A desobstrução das tomadas, a estanqueidade das conexões e a ligação em ordem correta aos tubos do manômetro foram cuidadosamente verificadas.

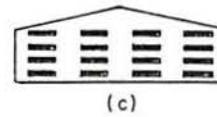
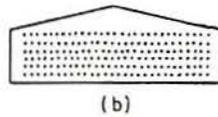
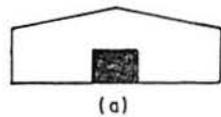
#### 4.1.4 - Ordem dos ensaios para o modelo de P.I.

De acordo com o exposto em 3.2.2, são três os tipos básicos de aberturas estudadas: (a) aberturas tipo portão e janela, (b) permeabilidade disseminada feita de pequenos furos circulares, e (c) um tipo intermediário imitando janelas tipo basculante.

Este estudo baseia-se na combinação destes três tipos básicos (ver figura 4.2), da seguinte maneira:

Cada um destes três tipos básicos de abertura possui vários tamanhos, ou seja, diferentes áreas para um mesmo tipo de abertura. Cada uma destas áreas é relacionada com a maior área da abertura localizada no oitão, para cada tipo básico. Isto faz com que a proporção das aberturas em relação à maior abertura do oitão varie desde 1/8 até 1, como já mostrado, junto à outras características das aberturas, na tabela 3.2.

A maior abertura de cada tipo, localizada no oitão, caracteriza uma série de ensaios ao ser combinada com outras aberturas de qualquer tipo ou dimensões. Em cada uma das três séries são estudadas 25 combinações, cada uma delas submetidas a três ângulos de incidência do vento. Cada combinação submetida a uma incidência do vento é chamada de caso. Há ainda duas combinações independentes, com aberturas localizadas somente nas paredes laterais e submetida a duas incidências do vento (4 casos). Além disso, alguns casos das três séries se repetem, não sendo necessário ensaiá-los novamente. Desta



ABERTURAS	
—	tipo (a)
	tipo (b)
---	tipo (c)

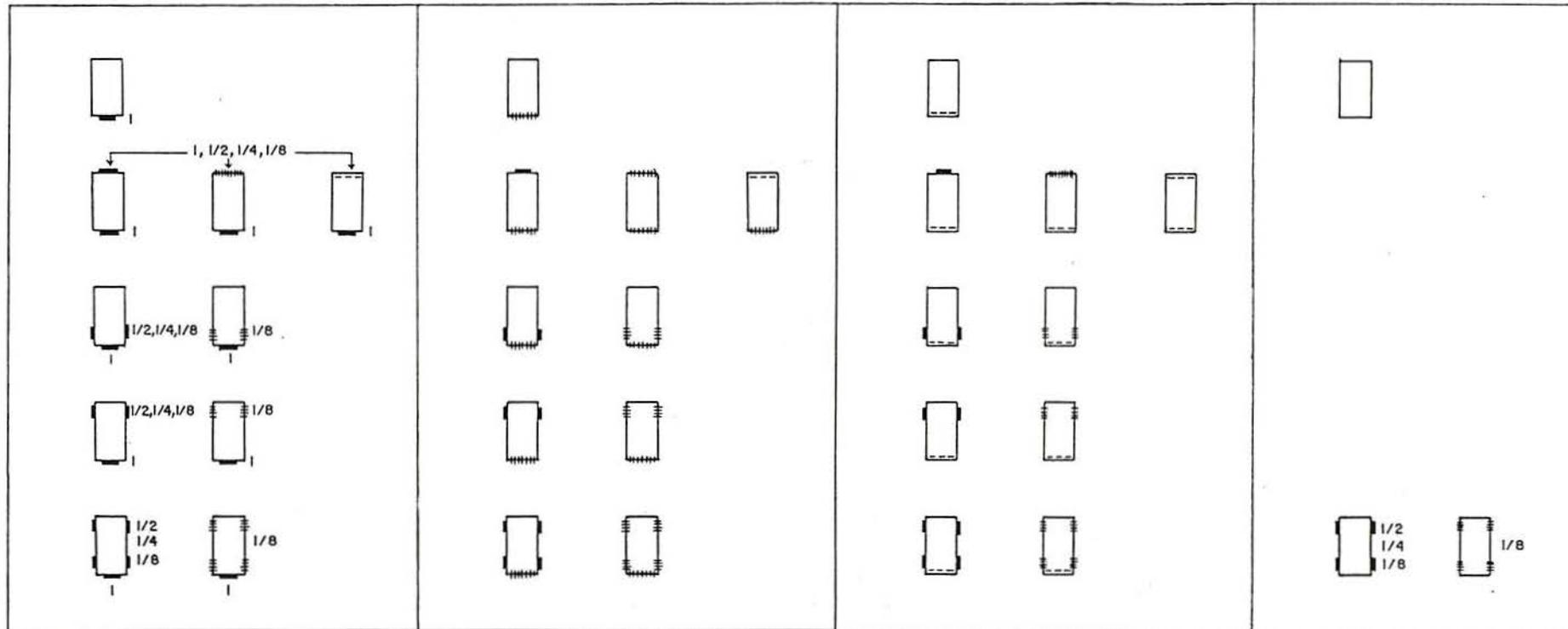
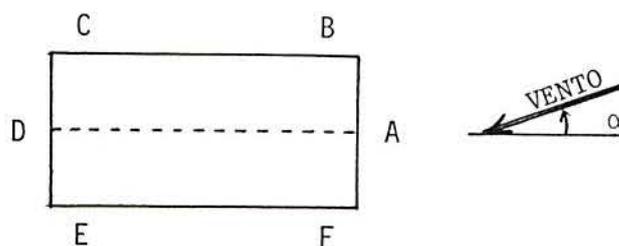


Fig. 4.2 - Combinações dos tipos de abertura estudados: localização, tipo e proporção em relação à maior abertura do oitão.

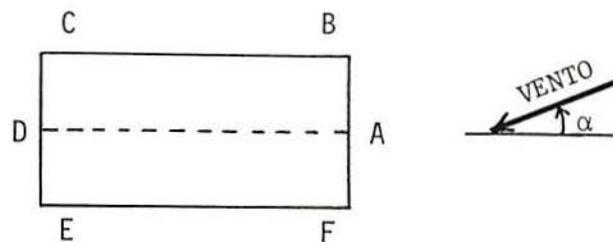
Tab. 4.1 - Proporção em relação à maior abertura do oitão, localização e tipo de cada abertura para as diversas combinações estudadas.

COMB/ CASO	LOCAL					
	A	B	C	D	E	F
1	<u>1</u>	0	0	0	0	0
2	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
3	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
4	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
5	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
6	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
7	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
8	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
9	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
10	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
11	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
12	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
13	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
14	<u>1</u>	<u>1/2</u>	0	0	0	<u>1/2</u>
15	<u>1</u>	<u>1/4</u>	0	0	0	<u>1/4</u>
16	<u>1</u>	<u>1/8</u>	0	0	0	<u>1/8</u>
17	<u>1</u>	<u>1/8</u>	0	0	0	<u>1/8</u>
18	<u>1</u>	0	<u>1/2</u>	0	<u>1/2</u>	0
19	<u>1</u>	0	<u>1/4</u>	0	<u>1/4</u>	0
20	<u>1</u>	0	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	0
21	<u>1</u>	0	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	0
22	<u>1</u>	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>	0	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>
23	<u>1</u>	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>	0	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>
24	<u>1</u>	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>
25	<u>1</u>	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>



Tab 4.1 - cont....

COMB/ CASO	LOCAL					
	A	B	C	D	E	F
26	1	0	0	0	0	0
27	1	0	0	1	0	0
28	1	0	0	1/2	0	0
29	1	0	0	1/4	0	0
30	1	0	0	1/8	0	0
31	1	0	0	1	0	0
32	1	0	0	1/2	0	0
33	1	0	0	1/4	0	0
34	1	0	0	1/8	0	0
35	1	0	0	1	0	0
36	1	0	0	1/2	0	0
37	1	0	0	1/4	0	0
38	1	0	0	1/8	0	0
39	1	1/2	0	0	0	1/2
40	1	1/4	0	0	0	1/4
41	1	1/8	0	0	0	1/8
42	1	1/8	0	0	0	1/8
43	1	0	1/2	0	1/2	0
44	1	0	1/4	0	1/4	0
45	1	0	1/8	0	1/8	0
46	1	0	1/8	0	1/8	0
47	1	1/2	1/2	0	1/2	1/2
48	1	1/4	1/4	0	1/4	1/4
49	1	1/8	1/8	0	1/8	1/8
50	1	1/8	1/8	0	1/8	1/8



Tab. 4.1 - cont...

COMB/ CASO	LOCAL					
	A	B	C	D	E	F
51	<u>1</u>	0	0	0	0	0
52	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
53	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
54	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
55	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
56	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
57	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
58	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
59	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
60	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	0	0
61	<u>1</u>	0	0	<u>1/2</u>	0	0
62	<u>1</u>	0	0	<u>1/4</u>	0	0
63	<u>1</u>	0	0	<u>1/8</u>	0	0
64	<u>1</u>	<u>1/2</u>	0	0	0	<u>1/2</u>
65	<u>1</u>	<u>1/4</u>	0	0	0	<u>1/4</u>
66	<u>1</u>	<u>1/8</u>	0	0	0	<u>1/8</u>
67	<u>1</u>	<u>1/8</u>	0	0	0	<u>1/8</u>
68	<u>1</u>	0	<u>1/2</u>	0	<u>1/2</u>	0
69	<u>1</u>	0	<u>1/4</u>	0	<u>1/4</u>	0
70	<u>1</u>	0	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	0
71	<u>1</u>	0	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	0
72	<u>1</u>	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>	0	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>
73	<u>1</u>	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>	0	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>
74	<u>1</u>	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>
75	<u>1</u>	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>
76	0	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>	0	<u>1/2</u>	<u>1/2</u>
77	0	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>	0	<u>1/4</u>	<u>1/4</u>
78	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>
79	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>	0	<u>1/8</u>	<u>1/8</u>

maneira, 79 combinações são ensaiadas, para diversas incidências do vento, perfazendo um total de 233 casos estudados para cada um dos tipos de vento utilizados neste trabalho. Isto dá um total de 466 casos ensaiados. Se for lembrado que em cada caso a pressão é lida em 24 tomadas, chega-se a um total de 11.184 pontos de leitura de pressão interna (sem contar as leituras feitas nas tomadas externas).

A tabela 4.1 completa a figura 4.2. Ela indica a localização, tipo e proporção das aberturas para cada combinação estudada. Assim, as letras A a F, na linha superior das tabelas, indicam a localização, no modelo, de cada tipo de abertura; a coluna da extremidade esquerda indica a combinação (1 a 79). Nas colunas intermediárias encontra-se a proporção de cada abertura em relação à maior abertura do oitão, sublinhada pelo código que indica o seu tipo; desta forma, o traço cheio indica abertura tipo (a), os pontos indicam abertura tipo (b), e o tracejado abertura tipo (c). O zero indica que não há aberturas naquela região. As combinações de 1 a 75 foram ensaiadas para  $\alpha = 0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ; para as combinações 76 a 79,  $\alpha = 0^\circ$  e  $90^\circ$  (devido à simetria).

#### 4.1.5 - Estanqueidade do modelo de P.I.

Um fator extremamente importante é a estanqueidade do modelo de pressão interna, para que os resultados obtidos não se apresentem mascarados por uma possível permeabilidade que possa vir a alterar os valores dos coeficientes medidos. Para vedação das frestas existentes entre as zonas limitrofes das placas, quando em contato umas com as outras, e das próprias aberturas quando não eram necessárias em um determinado ensaio, recorreu-se ao uso de fitas adesivas. O procedimento para verificação da validade do emprego deste tipo de recurso foi o seguinte:

Inicialmente uma das tomadas internas do modelo foi conectada a um dos extremos do Betz, tendo sido deixado seu outro extremo livre, em contato com a pressão atmosférica, assim como o restante das tomadas de P.I. Fechou-se então o modelo completamente, com uma camada de fita adesiva de um determinado tipo. O modelo encontrava-se internamente com uma

pressão igual à pressão atmosférica, pressão esta que deveria manter-se caso o modelo estivesse completamente vedado.

Ao ser submetido ao vento, o que foi verificado é que no interior do modelo havia sucção, indicando que havia uma permeabilidade disseminada pelo mesmo e, obviamente, que a vedação não era perfeita.

Partiu-se então para uma situação extrema: cobriu-se o modelo com várias camadas de fita dos mais diversos tipos: durex, fita mágica, fita crepe, filme plástico para congelamento, e até esparadrapo vendido como impermeável (diga-se de passagem que impermeável só à água, porque ao ar é extremamente permeável). O que ocorreu desta vez foi que, no início, a P.I. era igual à pressão atmosférica, porém, de uma maneira extremamente lenta, iniciava-se novamente uma depressão no interior do modelo, indicando que ainda havia uma permeabilidade disseminada pelo mesmo (pequeníssima, é verdade, mas que de fato existia).

Para saber qual a influência desta permeabilidade nas medições com as aberturas, foi feito um rasgo bem pequeno com a ponta de um canivete (cuja área é menor que a área de um único furo das placas utilizadas para simulação de permeabilidade disseminada) nas fitas que cobriam a abertura de barlavento. Imediatamente estabeleceu-se no interior do modelo uma sobrepressão bem definida, onde anteriormente havia sucção, com um valor praticamente igual à pressão externa naquele ponto.

Este fato não só indica que, em relação às dimensões das aberturas do modelo esta permeabilidade devida às fitas não tinha influência alguma, mas também confirma um fato muito importante: que já com uma pequeníssima abertura ou permeabilidade disseminada já é estabelecida no interior da edificação uma pressão que é função da pressão externa na região da abertura ou poros.

O "ponto ótimo", para este trabalho, foi encontrado utilizando-se duas camadas de fita crepe e duas camadas de fita durex. Para esta combinação, a permeabilidade disseminada devida às fitas não causava alteração sensível na P.I. devida somente às aberturas do tipo (a), (b) e (c) ensaiadas.

#### 4.1.6 - Ensaios

Uma vez feitas todas as verificações, iniciava-se o ensaio. Após ligado o motor do túnel, a velocidade do vento era regulada de maneira a permanecer aproximadamente a mesma em todos os ensaios.

As velocidades do vento em cada ensaio foram obtidas indiretamente a partir das pressões dinâmicas que, por sua vez, foram determinadas indiretamente com o Betz, como já descrito.

Após estabilizada a velocidade do vento, para cada ângulo de ensaio era lida a temperatura do ar na câmara, a pressão atmosférica, e batida uma foto do multimanômetro a álcool. Quando os níveis das colunas de álcool oscilavam, procurou-se sempre fotografar no momento em que o nível do líquido manométrico estivesse equidistante dos extremos de variação; além disso, eram medidos estes limites manualmente, com o auxílio de uma régua milimetrada.

#### 4.2 - Tipos de vento

O modelo foi submetido a dois tipos de vento: um deslizante e turbulento, e o outro uniforme e suave.

A utilização do vento uniforme e suave ( $I_1 = 1\%$  no nível da cumeeira), neste trabalho, teve unicamente a função de servir como um termo de comparação, pois é um tipo de escoamento que não apresenta flutuações e, portanto, os coeficientes de pressão não apresentam variações temporais.

O vento deslizante e turbulento é o que realmente importa para aplicação prática, pois é uma simulação do vento natural. A importância da correta simulação das principais características do vento natural é descrita no recente trabalho de Blessmann<sup>10</sup>.

Foi simulado um vento com perfil de velocidades médias horárias seguindo uma curva de potência, de expoente  $p = 0,23$ , expresso por:

$$\bar{V}(x_3) / \bar{V}_{ref} = (x_3 / x_{ref})^p$$

sendo:

$\bar{V}(x_g)$  : velocidade média na altura  $x_g$  acima do piso do túnel;

$\bar{V}_{ref}$  : velocidade média em uma altura de referência; no túnel, a 450mm do piso (eixo longitudinal);

$p = 0,23$  (expoente da lei potencial).

Esta lei potencial pode ser aplicada em condições de estabilidade neutra da atmosfera, que são as condições reinantes em ventos fortes sem processos de convecção. Este perfil corresponde a terreno com rugosidade situada entre as Categorias de terreno III e IV, da edição 1988 da Norma Brasileira NBR-6123, "Forças devidas ao vento em edificações"<sup>3</sup>. Para a Categoria III a cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m e, para a Categoria IV, igual a 10,0m.

A figura 4.3 mostra as principais características do vento simulado, que são as seguintes<sup>7</sup>:

-- perfil vertical de velocidades médias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (na figura aparecem os pontos experimentais e a curva teórica). É função da rugosidade do terreno situado em uma extensa região a barlavento da edificação. Esta rugosidade pode ser caracterizada pelo parâmetro  $z_0$ , conhecido como "comprimento de rugosidade". Este parâmetro está ligado à altura média das rugosidades. Além deste, um outro parâmetro de interesse na definição de um perfil de velocidades médias, é o "deslocamento do plano zero",  $z_d$ ;

-- intensidade da componente longitudinal da turbulência,  $I_1$ , que é uma medida da energia cinética total contida nas flutuações da velocidade do vento (rajadas);

-- macroescala (ou escala integral) da componente longitudinal da turbulência,  $L_1$ , que indica as dimensões dos maiores turbilhões do vento incidente.

Tendo em vista a altura da camada limite e a dimensão média dos maiores turbilhões simulados no TV-2 ( $L_1 = 280\text{mm}$  na altura de referência: cumeeira), a escala aproximada do modelo é de 1/250.

As medições foram feitas nas velocidades máximas alcançadas no TV-2: 39 m/s nos ensaios com escoamento suave e uniforme, e 25 m/s nos testes com escoamento turbulento e deslizante (velocidades no topo dos modelos).

O número de Reynolds,  $Re$ , é definido por

$$Re = \bar{V} h_c / \nu$$

sendo:

$\bar{V}$  - velocidade média no topo da cobertura

$h_c$  - altura da cumeeira

$\nu$  - viscosidade cinemática do ar

Para o escoamento suave e uniforme,  $Re = 172.000$ ; para o turbulento e deslizante,  $Re = 107.000$ .

Além disso tem-se, para escoamento turbulento e deslizante,  $I_1 = 15\%$  (no nível da cumeeira),  $z_o = 7,4\text{mm}$  e  $z_d = 32,9\text{mm}$ .

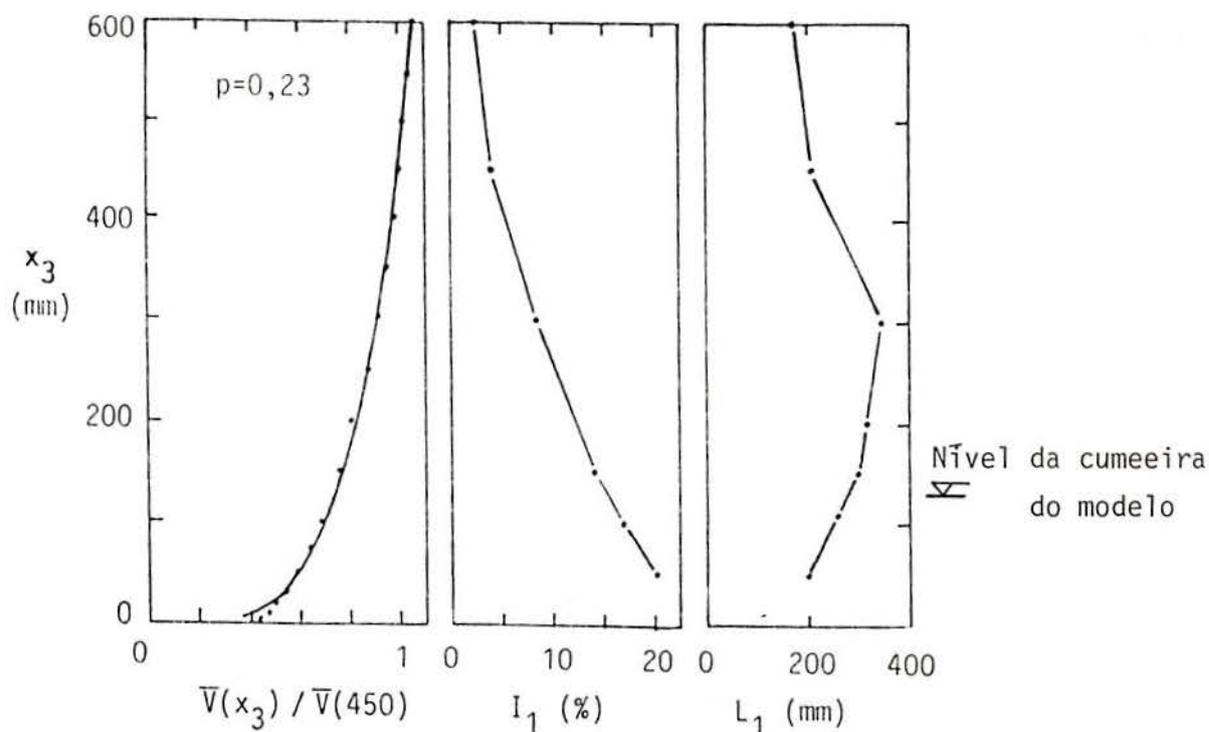


Fig. 4.3 - Principais características do vento simulado.

## 5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 - Resultados

De acordo com 2.1, o coeficiente de pressão tem a seguinte definição:

$$c_p = \Delta p / q$$

Conforme visto em 4.1, este coeficiente é obtido, nas medições no túnel de vento, por:

$$c_p = \Delta p / (k \Delta p_A)$$

Os valores  $\Delta p$  e  $\Delta p_A$  foram medidos diretamente através das projeções dos negativos dos registros fotográficos, e os valores da relação  $k$  através de ensaios preliminares, como já explicado.

Os coeficientes de pressão são referenciados ao topo do modelo, no nível da cumeeira.

Devido ao fato de ser a razão de bloqueio, definida como a relação entre a área de sombra do modelo (área da projeção da secção do modelo sobre o plano da secção transversal do túnel) e a área útil da secção do túnel (acima da plataforma), muito baixa (2,6%), não é feita, neste trabalho, nenhuma correção para efeitos de bloqueio.

É feita a suposição de que as condições do campo aerodinâmico em torno do modelo colocado no túnel de vento não sofrem alterações significativas em relação às existentes em torno da construção real, na atmosfera livre, em que o escoamento de ar pode ser considerado ilimitado em altura.

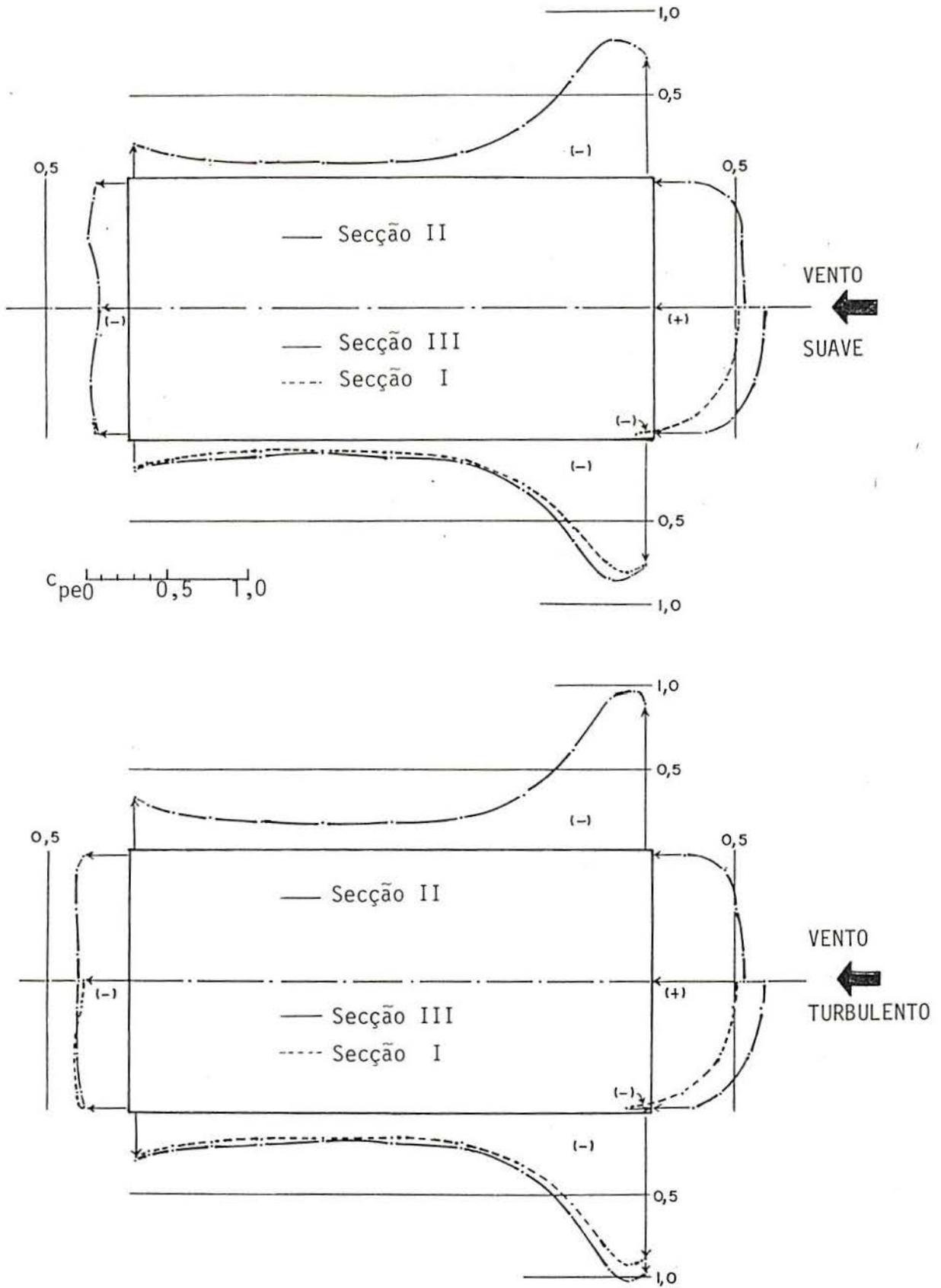
A partir dos coeficientes de pressão, são obtidos, por integração (2.1), os coeficientes de forma, que constituem-se na base deste estudo.

Inicialmente são obtidos os coeficientes externos, pois conforme visto em 2.2, a proposta é que o coeficiente de forma interno seja obtido, através da fórmula usual, em função dos coeficientes de forma externos, calculados sobre a superfície das aberturas.

A distribuição das pressões externas sobre o pavilhão, para os dois tipos de vento, é mostrada nas figuras 5.1 e 5.2.

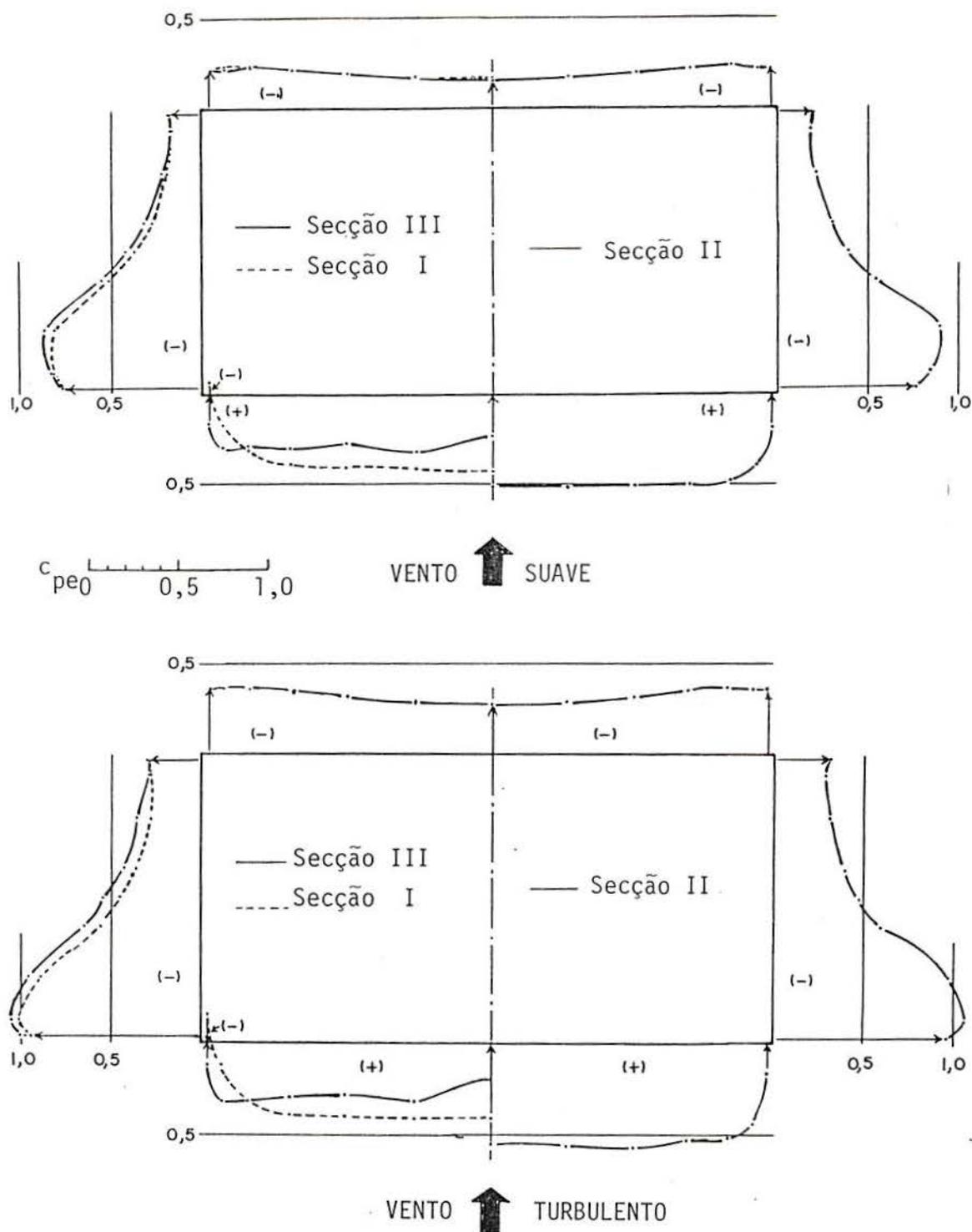
As pressões internas costumam ser consideradas iguais em todo o interior da edificação. Na realidade, em muitos casos há diferenças sensíveis. Para verificar se esta variação tem significado em termos práticos, foram calculados a média simples e o desvio padrão dos coeficientes de P.I., além de serem anotados os seus valores extremos. Estes valores extremos têm unicamente a finalidade de mostrar que, em pelo menos alguma região da edificação, a pressão pode vir a ter um valor diferente do valor que ocorre na maior parte desta. Estes valores diferentes, alguns com muita diferença em relação ao valor médio, geralmente encontram-se bem próximos à alguma abertura e respondem segundo a pressão no exterior destas aberturas.

Este coeficiente de forma interno obtido pela média dos coeficientes de pressão interna ( $C_i$  medido) é comparado com os valores dos coeficientes de forma obtidos através da fórmula convencional (em função de  $C_e$ ), para os três expoentes de escoamento  $n$  mais utilizados: 0,5, 0,65 e 1,0. Os valores calculados e medidos correspondentes a cada caso encontram-se nas tabelas 5.1 (vento turbulento e deslizante) e 5.2 (vento suave e uniforme). Para este fim, utilizou-se um programa de computador baseado no trabalho de Cunha e Cláudio<sup>18</sup>, do grupo de Matemática Computacional do Curso de Pós-Graduação em Ciências de Computação da UFRGS. Eles desenvolveram um algoritmo estável para o cálculo da P.I. através da fórmula usual, que é uma expressão que apresenta uma alta instabilidade numérica.



(Localização das secções: Fig. 3.3)

Fig. 5.1 - Distribuição das P.E. para os dois tipos de vento ( $\alpha = 0^\circ$ ).



(Localização das secções: Fig. 3.3)

Fig. 5.2 - Distribuição das P.E. para os dois tipos de vento ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Tab. 5.1 - Valores calculados e medidos de 100Ci para vento turbulento.

VENTO	100 Ci						
	CALCULADOS				MEDIDOS		
	CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio
01-0	53	53	53	52	52	52	0,0
01-90	-46	-46	-46	-44	-44	-44	0,0
01-180	-30	-30	-30	-28	-25	-26	0,9
02-0	12	12	11	08	19	14	2,2
02-90	-46	-46	-46	-44	-42	-43	0,8
02-180	12	12	11	08	23	12	3,0
03-0	36	32	25	35	44	38	1,8
03-90	-46	-46	-46	-44	-44	-44	0,0
03-180	-13	-9	-2	-16	00	-13	3,1
04-0	48	44	37	42	46	44	0,4
04-90	-46	-46	-46	-44	-44	-44	0,0
04-180	-25	-21	-13	-28	-11	-25	3,2
05-0	52	50	44	48	50	49	0,5
05-90	-46	-46	-46	-44	-42	-43	0,7
05-180	-29	-27	-21	-30	-16	-28	2,4
06-0	10	11	10	-01	14	4	3,1
06-90	-52	-52	-53	-52	-52	-52	0,0
06-180	12	12	12	10	14	12	0,7
07-0	36	31	25	28	40	32	2,2
07-90	-49	-50	-51	-48	-45	-47	0,9
07-180	-13	-8	-2	-12	-08	-12	1,0
08-0	48	44	36	41	48	43	1,3
08-90	-47	-47	-49	-48	-46	-46	0,6
08-180	-25	-21	-13	-24	-24	-24	0,0
09-0	52	50	44	44	48	46	0,7
09-90	-46	-46	-47	-46	-45	-45	0,4
09-180	-29	-27	-21	-28	-26	-27	0,9
10-0	10	11	10	04	18	9	3,2
10-90	-52	-52	-53	-52	-49	-50	1,0
10-180	13	13	13	11	16	14	1,5
11-0	36	31	25	32	42	35	2,0
11-90	-49	-50	-51	-45	-45	-45	0,0
11-180	-13	-8	-2	-16	-12	-13	1,5
12-0	48	44	36	43	48	44	0,9
12-90	-47	-47	-49	-45	-45	-45	0,0
12-180	-25	-21	-13	-24	-22	-23	0,9
13-0	52	50	44	47	49	47	0,4
13-90	-46	-46	-47	-45	-45	-45	0,0
13-180	-29	-27	-21	-27	-25	-25	0,8
14-0	-21	-21	-21	-14	04	-7	4,1
14-90	-34	-31	-24	-36	-25	-30	2,3
14-180	-28	-28	-28	-28	-27	-26	0,5
15-0	23	15	3	24	36	27	2,4
15-90	-38	-37	-31	-37	-32	-34	1,3
15-180	-29	-29	-29	-28	-28	-28	0,0
16-0	44	37	23	38	47	40	1,5
16-90	-44	-42	-37	-40	-36	-37	0,9
16-180	-30	-29	-29	-28	-27	-28	0,5

Tab. 5.1 - cont...

VENTO	100 Ci						
	0,23	CALCULADOS				MEDIDOS	
		CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media
17-0	45	37	23	39	47	40	1,5
17-90	-44	-42	-37	-40	-36	-38	0,9
17-180	-30	-30	-29	-28	-27	-28	0,5
18-0	13	14	13	20	32	23	2,5
18-90	-34	-31	-24	-42	-25	-36	3,1
18-180	-62	-62	-62	-55	-52	-53	1,0
19-0	37	33	27	37	37	37	0,0
19-90	-38	-37	-31	-44	-33	-39	2,1
19-180	-43	-47	-52	-40	-40	-40	0,0
20-0	49	45	38	41	46	43	0,7
20-90	-44	-42	-37	-44	-44	-44	0,0
20-180	-34	-37	-43	-32	-32	-32	0,0
21-0	48	45	37	44	48	44	0,8
21-90	-44	-42	-37	-41	-40	-40	0,4
21-180	-34	-37	-43	-32	-32	-32	0,0
22-0	-26	-25	-23	-24	-12	-17	4,0
22-90	-26	-22	-17	-32	-17	-25	3,2
22-180	-41	-45	-50	-45	-41	-43	1,1
23-0	-1	-2	-4	00	16	6	3,6
23-90	-34	-30	-23	-33	-26	-31	1,8
23-180	-35	-39	-45	-36	-34	-35	0,9
24-0	31	25	15	32	44	35	2,2
24-90	-38	-37	-31	-36	-34	-36	0,7
24-180	-32	-34	-40	-30	-30	-30	0,0
25-0	31	25	15	27	40	30	2,5
25-90	-39	-37	-31	-36	-36	-36	0,0
25-180	-32	-34	-40	-33	-32	-32	0,3
26-0	55	55	55	52	52	52	0,0
26-90	-59	-59	-59	-64	-64	-64	0,0
26-180	-32	-32	-32	-32	-32	-32	0,0
27-0	12	12	12	10	14	12	0,7
27-90	-52	-52	-53	-52	-52	-52	0,0
27-180	10	11	10	-01	14	4	3,1
28-0	38	34	27	28	31	29	0,7
28-90	-56	-56	-55	-56	-56	-56	0,0
28-180	-15	-10	-4	-24	-05	-19	3,7
29-0	50	46	38	40	42	41	0,7
29-90	-58	-58	-56	-60	-57	-59	0,9
29-180	-27	-23	-15	-28	-12	-24	2,9
30-0	54	52	46	48	48	48	0,0
30-90	-59	-58	-57	-60	-60	-60	0,0
30-180	-30	-29	-22	-28	-16	-26	2,5
31-0	11	11	11	-01	04	1	1,1
31-90	-59	-59	-59	-61	-60	-61	0,3
31-180	11	11	11	02	06	4	0,6
32-0	38	33	26	24	24	24	0,0
32-90	-59	-59	-59	-64	-61	-63	1,0
32-180	-15	-10	-3	-19	-14	-17	0,8

Tab. 5.1 - cont...

VENTO	100 Ci						
	0,23	CALCULADOS			MEDIDOS		
		CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media
133-0	50	46	38	39	40	39	0,3
133-90	-59	-59	-59	-64	-60	-61	0,7
133-180	-27	-23	-15	-27	-24	-25	0,9
134-0	54	52	45	43	44	44	0,3
134-90	-59	-59	-59	-64	-61	-63	0,9
134-180	-31	-29	-23	-28	-28	-28	0,0
135-0	11	11	11	04	08	7	0,7
135-90	-59	-59	-59	-64	-64	-64	0,0
135-180	11	11	11	00	04	3	1,5
136-0	38	33	26	28	28	28	0,0
136-90	-59	-59	-59	-64	-60	-61	1,0
136-180	-15	-10	-3	-21	-16	-17	1,9
137-0	50	46	38	43	44	43	0,3
137-90	-59	-59	-59	-61	-61	-61	0,0
137-180	-27	-23	-15	-26	-24	-24	0,8
138-0	54	52	45	44	44	44	0,0
138-90	-59	-59	-59	-62	-60	-61	0,4
138-180	-31	-29	-23	-29	-28	-28	0,4
139-0	-20	-20	-20	-12	-08	-12	1,0
139-90	-37	-36	-30	-45	-32	-38	2,4
139-180	-29	-29	-29	-32	-29	-30	1,2
140-0	25	16	5	20	24	22	0,8
140-90	-49	-46	-40	-48	-42	-44	1,0
140-180	-31	-30	-30	-29	-29	-29	0,0
141-0	46	39	25	36	40	38	0,8
141-90	-56	-53	-47	-52	-52	-52	0,0
141-180	-32	-31	-30	-32	-32	-32	0,0
142-0	46	39	25	35	36	36	0,5
142-90	-56	-53	-48	-56	-53	-54	0,8
142-180	-32	-31	-31	-32	-32	-32	0,0
143-0	14	14	15	19	20	20	0,5
143-90	-37	-36	-30	-54	-34	-46	4,0
143-180	-63	-63	-63	-56	-56	-56	0,0
144-0	39	34	28	36	38	36	0,6
144-90	-49	-46	-40	-53	-41	-48	2,4
144-180	-45	-48	-53	-45	-44	-45	0,5
145-0	50	47	39	44	44	44	0,0
145-90	-56	-53	-47	-57	-54	-56	0,5
145-180	-36	-39	-45	-36	-36	-36	0,0
146-0	50	46	39	42	44	43	0,6
146-90	-56	-53	-48	-56	-53	-55	1,0
146-180	-36	-39	-45	-38	-38	-38	0,0
147-0	-26	-25	-22	-21	-16	-20	1,2
147-90	-30	-26	-21	-37	-23	-32	3,0
147-180	-42	-46	-51	-44	-40	-42	1,1
148-0	0	-1	-3	04	07	4	0,6
148-90	-37	-36	-30	-41	-32	-38	2,1
148-180	-37	-40	-46	-40	-37	-39	1,0

Tab. 5.1 - cont...

VENTO	100 Ci						
	0,23	CALCULADOS			MEDIDOS		
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
149-0	33	26	17	27	29	28	0,3
149-90	-49	-46	-40	-48	-44	-47	1,1
149-180	-33	-36	-41	-36	-34	-35	0,9
150-0	33	26	16	26	28	27	0,6
150-90	-49	-46	-40	-50	-48	-48	0,6
150-180	-34	-36	-42	-36	-36	-36	0,0
151-0	55	55	55	53	56	55	0,5
151-90	-59	-59	-59	-62	-58	-60	0,7
151-180	-32	-32	-32	-32	-32	-32	0,0
152-0	13	13	13	11	16	14	1,5
152-90	-52	-52	-53	-52	-49	-50	1,0
152-180	10	11	10	04	18	9	3,2
153-0	38	34	27	30	32	32	0,5
153-90	-56	-56	-55	-57	-53	-55	1,2
153-180	-15	-10	-4	-20	-05	-17	2,9
154-0	50	46	38	40	40	40	0,0
154-90	-58	-58	-56	-60	-57	-60	0,9
154-180	-27	-23	-15	-27	-12	-24	2,6
155-0	54	52	46	44	47	46	1,2
155-90	-59	-58	-57	-60	-57	-60	0,9
155-180	-30	-29	-22	-28	-16	-27	2,5
156-0	11	11	11	00	04	3	1,5
156-90	-59	-59	-59	-64	-64	-64	0,0
156-180	11	11	11	04	08	7	0,7
157-0	38	33	26	26	28	28	0,5
157-90	-59	-59	-59	-61	-58	-60	0,5
157-180	-15	-10	-3	-16	-12	-14	1,0
158-0	50	46	38	37	40	39	0,9
158-90	-59	-59	-59	-64	-60	-62	1,0
158-180	-27	-23	-15	-26	-22	-24	1,1
159-0	54	52	45	46	48	48	0,5
159-90	-59	-59	-59	-61	-58	-60	0,6
159-180	-31	-29	-23	-28	-26	-27	0,8
160-0	11	11	11	00	04	4	2,1
160-90	-59	-59	-59	-64	-60	-63	1,2
160-180	11	11	11	04	10	8	1,3
161-0	38	33	26	28	31	30	1,2
161-90	-59	-59	-59	-61	-58	-60	0,7
161-180	-15	-10	-3	-20	-14	-16	2,0
162-0	50	46	38	38	40	40	0,5
162-90	-59	-59	-59	-60	-57	-59	0,7
162-180	-27	-23	-15	-25	-24	-24	0,5
163-0	54	52	45	44	47	46	1,0
163-90	-59	-59	-59	-64	-60	-61	1,2
163-180	-31	-29	-23	-29	-28	-28	0,4
164-0	-20	-20	-20	-13	-08	-10	1,7
164-90	-37	-36	-30	-46	-32	-38	2,5
164-180	-29	-29	-29	-28	-28	-28	0,0

Tab. 5.1 - cont...

VENTO	100 Ci						
	0,23	CALCULADOS			MEDIDOS		
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
165-0	25	16	5	23	24	24	0,4
165-90	-49	-46	-40	-49	-44	-46	1,3
165-180	-31	-30	-30	-29	-29	-29	0,0
166-0	46	39	25	39	40	40	0,4
166-90	-56	-53	-47	-56	-52	-53	0,8
166-180	-32	-31	-30	-30	-30	-30	0,0
167-0	46	39	25	35	36	36	0,4
167-90	-56	-53	-48	-60	-54	-56	1,1
167-180	-32	-31	-31	-33	-31	-32	0,6
168-0	14	14	15	19	23	21	1,0
168-90	-37	-36	-30	-53	-32	-45	4,0
168-180	-63	-63	-63	-56	-53	-54	1,1
169-0	39	34	28	34	36	36	0,5
169-90	-49	-46	-40	-55	-44	-50	2,2
169-180	-45	-48	-53	-44	-44	-44	0,0
170-0	50	47	39	44	44	44	0,0
170-90	-56	-53	-47	-56	-52	-55	1,3
170-180	-36	-39	-45	-40	-38	-38	0,4
171-0	50	46	39	40	40	40	0,0
171-90	-56	-53	-48	-56	-52	-54	1,3
171-180	-36	-39	-45	-40	-38	-39	0,9
172-0	-26	-25	-22	-21	-16	-17	1,6
172-90	-30	-26	-21	-38	-24	-33	3,2
172-180	-42	-46	-51	-41	-40	-40	0,5
173-0	0	-1	-3	04	08	7	1,3
173-90	-37	-36	-30	-44	-33	-40	2,2
173-180	-37	-40	-46	-39	-37	-38	0,6
174-0	33	26	17	24	27	26	1,1
174-90	-49	-46	-40	-49	-46	-48	0,6
174-180	-33	-36	-41	-36	-36	-36	0,0
175-0	33	26	16	25	28	27	1,0
175-90	-49	-46	-40	-48	-44	-45	1,0
175-180	-34	-36	-42	-36	-36	-36	0,0
176-0	-60	-60	-60	-61	-56	-59	1,6
176-90	-2	-2	-2	-14	-05	-11	2,4
177-0	-61	-61	-61	-60	-60	-60	0,0
177-90	0	0	0	-08	00	-4	1,4
178-0	-60	-60	-60	-60	-60	-60	0,0
178-90	0	0	0	-04	-01	-4	0,7
179-0	-60	-61	-60	-64	-61	-63	1,3
179-90	-2	-2	-2	-12	-09	-11	1,0

Tab. 5.2 - Valores calculados e medidos de 100Ci para vento suave.

VENTO	100 Ci						
	CALCULADOS				MEDIDOS		
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
101-0	53	53	53	50	52	50	0,4
101-90	-39	-39	-39	-34	-34	-34	0,0
101-180	-17	-17	-17	-16	-16	-16	0,0
102-0	18	18	18	16	26	19	2,2
102-90	-39	-39	-39	-36	-36	-36	0,0
102-180	18	18	18	15	26	18	2,4
103-0	39	35	30	37	47	39	1,9
103-90	-39	-39	-39	-36	-36	-36	0,0
103-180	-3	0	6	-09	02	-6	2,2
104-0	49	46	39	34	40	34	1,2
104-90	-39	-39	-39	-37	-37	-37	0,0
104-180	-13	-10	-3	-16	-04	-15	2,3
105-0	52	50	45	46	48	46	0,4
105-90	-39	-39	-39	-36	-36	-36	0,0
105-180	-15	-14	-9	-16	-07	-15	1,8
106-0	16	16	16	06	18	11	2,7
106-90	-43	-43	-43	-42	-42	-42	0,0
106-180	18	18	18	14	19	17	0,9
107-0	38	34	29	31	42	34	2,1
107-90	-41	-41	-42	-40	-40	-40	0,0
107-180	-3	1	7	-06	-02	-4	1,1
108-0	49	45	38	42	49	43	1,3
108-90	-40	-40	-41	-36	-36	-36	0,0
108-180	-13	-9	-3	-16	-14	-15	0,9
109-0	52	50	45	46	48	46	0,4
109-90	-39	-39	-40	-37	-37	-37	0,0
109-180	-15	-14	-9	-16	-16	-16	0,0
110-0	17	17	17	10	21	14	2,6
110-90	-42	-42	-42	-43	-42	-42	0,5
110-180	16	16	15	16	20	18	1,5
111-0	38	34	29	34	44	36	1,9
111-90	-41	-41	-42	-39	-39	-39	0,0
111-180	-3	0	6	-08	-05	-6	1,1
112-0	50	45	39	42	50	44	1,4
112-90	-39	-40	-41	-38	-38	-38	0,0
112-180	-13	-10	-3	-16	-14	-15	0,9
113-0	52	50	45	46	49	46	0,6
113-90	-39	-39	-40	-36	-36	-36	0,0
113-180	-16	-14	-9	-15	-15	-15	0,0
114-0	-13	-13	-13	-09	06	-2	4,0
114-90	-23	-23	-18	-22	-15	-19	1,6
114-180	-16	-16	-16	-16	-16	-16	0,0
115-0	26	19	8	31	40	33	2,1
115-90	-31	-29	-24	-26	-20	-23	1,2
115-180	-17	-17	-17	-16	-16	-16	0,0
116-0	45	39	26	43	51	44	1,5
116-90	-37	-35	-30	-30	-28	-28	0,6
116-180	-17	-17	-17	-16	-16	-16	0,0

Tab. 5.2 - cont...

VENTO		100 Ci					
UNIF	CALCULADOS			MEDIDOS			
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
17-0	45	39	26	40	50	42	1,9
17-90	-37	-35	-31	-29	-30	-29	0,4
17-180	-17	-17	-17	-16	-16	-16	0,0
18-0	19	18	18	26	36	29	2,1
18-90	-23	-23	-18	-30	-16	-25	3,2
18-180	-49	-48	-49	-40	-36	-37	1,3
19-0	39	36	30	42	50	43	1,6
19-90	-31	-29	-24	-31	-22	-27	2,0
19-180	-30	-33	-38	-26	-24	-24	0,6
20-0	49	46	39	46	50	46	0,8
20-90	-37	-35	-30	-32	-28	-30	0,9
20-180	-21	-24	-30	-19	-19	-19	0,0
21-0	49	46	39	44	50	44	1,2
21-90	-37	-35	-31	-32	-30	-30	0,8
21-180	-21	-24	-30	-20	-19	-19	0,3
22-0	-16	-15	-14	-16	-01	-10	4,0
22-90	-18	-15	-11	-20	-08	-15	2,8
22-180	-29	-33	-38	-32	-28	-29	1,5
23-0	5	6	2	12	24	17	2,7
23-90	-23	-22	-17	-22	-14	-19	1,9
23-180	-23	-27	-32	-22	-22	-22	0,0
24-0	33	28	19	36	46	38	1,9
24-90	-31	-29	-24	-26	-22	-25	1,1
24-180	-19	-22	-27	-19	-19	-19	0,0
25-0	33	28	19	32	41	34	1,8
25-90	-32	-29	-25	-26	-26	-26	0,0
25-180	-19	-22	-27	-20	-20	-20	0,0
26-0	53	53	53	52	52	52	0,0
26-90	-48	-48	-48	-52	-52	-52	0,0
26-180	-20	-20	-20	-21	-21	-21	0,0
27-0	18	18	18	14	19	17	0,9
27-90	-43	-43	-43	-42	-42	-42	0,0
27-180	16	16	16	06	18	11	2,7
28-0	39	35	30	32	34	34	0,5
28-90	-46	-45	-45	-44	-42	-44	0,4
28-180	-5	-1	4	-10	01	-8	2,2
29-0	49	46	39	44	44	44	0,0
29-90	-47	-47	-46	-48	-46	-46	0,7
29-180	-16	-12	-5	-16	-04	-15	2,3
30-0	52	50	45	48	48	48	0,0
30-90	-48	-48	-47	-50	-48	-48	0,6
30-180	-19	-17	-12	-18	-07	-17	2,1
31-0	16	16	16	07	11	8	1,0
31-90	-48	-48	-48	-54	-52	-53	0,7
31-180	16	16	16	11	14	11	0,8
32-0	38	34	29	28	30	29	0,8
32-90	-48	-48	-48	-50	-53	-52	0,6
32-180	-5	-1	5	-08	-04	-7	0,9

Tab. 5.2 - cont...

VENTO		100 Ci					
UNIF	CALCULADOS			MEDIDOS			
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
133-0	49	45	38	42	42	0,0	
133-90	-48	-48	-48	-52	-52	0,0	
133-180	-16	-12	-5	-16	-14	0,9	
134-0	52	50	45	46	46	0,0	
134-90	-48	-48	-48	-52	-52	0,0	
134-180	-19	-17	-12	-18	-18	0,0	
135-0	17	17	17	10	12	0,7	
135-90	-47	-47	-47	-54	-50	0,9	
135-180	14	14	14	09	13	1,2	
136-0	38	34	29	30	32	0,6	
136-90	-48	-48	-48	-52	-50	0,8	
136-180	-5	-2	4	-11	-08	1,0	
137-0	50	45	39	43	43	0,0	
137-90	-48	-48	-48	-52	-52	0,0	
137-180	-16	-12	-6	-16	-14	0,9	
138-0	52	50	45	46	46	0,0	
138-90	-48	-48	-48	-51	-51	0,0	
138-180	-19	-17	-12	-18	-18	0,0	
139-0	-13	-13	-13	-08	-03	1,1	
139-90	-26	-25	-22	-31	-20	2,5	
139-180	-18	-18	-18	-18	-18	0,0	
140-0	26	19	8	26	28	0,5	
140-90	-38	-35	-30	-34	-30	1,0	
140-180	-19	-19	-19	-19	-19	0,0	
141-0	45	39	26	40	40	0,0	
141-90	-45	-43	-37	-40	-40	0,0	
141-180	-20	-20	-19	-20	-20	0,0	
142-0	45	39	26	38	40	0,4	
142-90	-45	-43	-38	-42	-40	0,5	
142-180	-20	-20	-19	-20	-20	0,0	
143-0	19	18	18	24	27	0,5	
143-90	-26	-25	-22	-42	-18	5,2	
143-180	-50	-50	-50	-44	-42	0,5	
144-0	39	36	30	38	38	0,0	
144-90	-38	-35	-30	-41	-30	2,3	
144-180	-32	-36	-40	-33	-33	0,0	
145-0	49	46	39	44	44	0,0	
145-90	-45	-43	-37	-44	-42	0,9	
145-180	-23	-26	-32	-26	-26	0,0	
146-0	49	46	39	42	42	0,0	
146-90	-45	-43	-38	-44	-42	0,8	
146-180	-24	-26	-32	-26	-26	0,0	
147-0	-16	-16	-14	-10	-04	1,2	
147-90	-20	-18	-14	-25	-12	3,0	
147-180	-30	-34	-39	-34	-30	1,0	
148-0	5	6	2	11	15	0,9	
148-90	-26	-25	-21	-30	-21	2,4	
148-180	-25	-28	-34	-28	-28	0,0	

Tab. 5.2 - cont...

VENTO		100 Ci					
UNIF	CALCULADOS			MEDIDOS			
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
149-0	33	28	19	32	34	32	0,4
149-90	-38	-35	-30	-37	-32	-35	1,0
149-180	-22	-24	-29	-25	-25	-25	0,0
150-0	33	28	19	28	30	28	0,4
150-90	-39	-36	-31	-36	-33	-35	0,8
150-180	-22	-24	-29	-25	-25	-25	0,0
151-0	48	48	48	50	50	50	0,0
151-90	-46	-46	-46	-50	-47	-49	0,8
151-180	-19	-19	-19	-20	-20	-20	0,0
152-0	16	16	15	16	20	18	1,5
152-90	-42	-42	-42	-43	-42	-42	0,5
152-180	17	17	17	10	21	14	2,6
153-0	35	31	26	32	34	34	0,8
153-90	-44	-44	-43	-44	-42	-43	0,7
153-180	-5	0	5	-10	02	-7	2,4
154-0	44	41	35	42	44	43	0,8
154-90	-45	-45	-44	-47	-44	-45	0,9
154-180	-15	-11	-5	-16	-03	-15	2,5
155-0	47	45	40	46	46	46	0,0
155-90	-46	-46	-45	-48	-46	-47	0,6
155-180	-18	-16	-11	-18	-09	-18	1,8
156-0	14	14	14	09	13	12	1,2
156-90	-47	-47	-47	-54	-50	-52	0,9
156-180	17	17	17	10	12	10	0,7
157-0	34	31	25	29	29	29	0,0
157-90	-46	-46	-46	-52	-48	-50	0,9
157-180	-4	0	5	-08	-03	-6	0,8
158-0	44	41	34	40	40	40	0,0
158-90	-46	-46	-47	-50	-47	-50	0,8
158-180	-15	-11	-4	-16	-14	-14	0,8
159-0	47	45	40	44	46	46	0,5
159-90	-46	-46	-46	-52	-48	-50	0,6
159-180	-18	-16	-11	-17	-17	-17	0,0
160-0	14	14	14	10	14	13	1,6
160-90	-46	-46	-46	-51	-47	-50	1,1
160-180	15	14	14	13	16	16	0,9
161-0	34	31	25	30	32	32	0,8
161-90	-46	-46	-46	-50	-47	-49	0,9
161-180	-5	0	5	-10	-06	-7	1,2
162-0	44	41	35	40	42	42	0,7
162-90	-46	-46	-46	-50	-46	-49	1,0
162-180	-15	-12	-5	-14	-14	-14	0,0
163-0	47	45	41	46	46	46	0,0
163-90	-46	-46	-46	-50	-47	-49	0,8
163-180	-18	-16	-11	-18	-17	-17	0,5
164-0	-16	-16	-16	-07	-02	-3	1,6
164-90	-26	-25	-22	-31	-22	-26	1,8
164-180	-17	-17	-18	-18	-18	-18	0,0

Tab. 5.2 - cont...

VENTO		100 Ci					
UNIF	CALCULADOS			MEDIDOS			
CASO	n = 0,5	n = 0,65	n = 1,0	extremos	media	desvio	
165-0	23	15	5	24	26	0,7	
165-90	-37	-34	-29	-36	-33	0,8	
165-180	-18	-18	-18	-19	-19	0,0	
166-0	40	34	22	40	40	0,0	
166-90	-43	-41	-36	-42	-42	0,0	
166-180	-19	-19	-18	-20	-20	0,0	
167-0	40	34	22	38	38	0,0	
167-90	-43	-41	-36	-42	-40	0,5	
167-180	-19	-19	-19	-20	-20	0,0	
168-0	16	16	16	24	28	1,3	
168-90	-26	-25	-22	-42	-13	5,6	
168-180	-49	-49	-49	-43	-40	0,9	
169-0	35	32	27	38	38	0,0	
169-90	-37	-34	-29	-40	-32	2,4	
169-180	-31	-35	-40	-31	-31	0,0	
170-0	44	41	35	44	44	0,0	
170-90	-43	-41	-36	-42	-39	1,0	
170-180	-23	-26	-31	-26	-26	0,0	
171-0	44	41	35	42	42	0,0	
171-90	-43	-41	-36	-42	-40	0,8	
171-180	-23	-25	-31	-26	-26	0,0	
172-0	-16	-16	-16	-12	-07	1,6	
172-90	-19	-17	-13	-26	-14	2,9	
172-180	-30	-34	-38	-32	-30	0,7	
173-0	3	2	0	10	14	1,2	
173-90	-25	-24	-20	-32	-22	2,0	
173-180	-24	-28	-34	-27	-27	0,0	
174-0	29	24	16	32	34	0,9	
174-90	-37	-34	-29	-37	-32	1,1	
174-180	-21	-23	-29	-24	-24	0,0	
175-0	29	24	16	28	28	0,0	
175-90	-37	-34	-30	-36	-34	0,7	
175-180	-21	-23	-29	-25	-24	0,2	
176-0	-48	-48	-48	-50	-44	1,6	
176-90	3	3	3	-03	04	2,0	
177-0	-49	-49	-49	-50	-48	0,9	
177-90	5	5	5	02	06	1,2	
178-0	-49	-49	-49	-54	-52	0,7	
178-90	6	5	5	00	04	1,0	
179-0	-49	-49	-48	-53	-53	0,0	
179-90	3	3	3	-02	-02	0,0	

Fotografias do multimanômetro mostrando a distribuição das P.E. e P.I. são mostradas nas figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

## 5.2 - Análise e discussão

Devido à enorme quantidade de casos ensaiados, o estudo será feito analisando e comparando casos semelhantes, de acordo com a incidência e tipo de vento, pois o fenômeno pode ser diferente para cada caso. O enfoque é dado para o comportamento da fórmula para o cálculo da P.I., e mais especificamente, para o comportamento do expoente  $n$ .

Os casos 1, 26 e 51, para todos os  $\alpha$ , são casos que servem como parâmetro de verificação, pois possuem somente uma abertura e devem responder segundo a pressão externa na superfície correspondente. Nestes casos, o enquadramento foi muito bom para os dois tipos de vento.

### 5.2.1 - VENTO TURBULENTO E DESLIZANTE

1) Casos 14 a 17  $\alpha = 0^\circ$



Com a diminuição das aberturas laterais, o expoente  $n$  vai aumentando, tendendo para 0,65. Com as duas aberturas menores (casos 16 e 17) é igual a 0,6 e para a intermediária é pouco inferior a 0,5. Para o caso 14, em que a soma das áreas das aberturas laterais é igual à área da abertura de barlavento,  $C_i$  foi o mesmo para qualquer  $n$ , mas apresentou uma diferença em relação ao coeficiente medido de 0,14.

2) Casos 18 a 21  $\alpha = 0^\circ$



Com as aberturas laterais agora localizadas na outra extremidade (mais afastadas da abertura do oitão), o fenômeno teve a mesma seqüência, com  $n$  aumentando com a diminuição da

área das aberturas laterais e a fórmula funcionando quando a área da abertura dominante era igual ou superior a duas vezes a área das outras aberturas. Para as duas aberturas menores (casos 20 e 21),  $n \approx 0,66$  e para a intermediária  $n = 0,5$ . Já para a maior abertura (caso 18) a diferença entre os  $C_i$  calculados e medidos é de  $0,10$ .

3) Casos 14 a 17  $\alpha = 180^\circ$



Com as aberturas bem imersas na esteira, os coeficientes medidos praticamente se igualam aos calculados, com uma diferença máxima de  $0,02$ . Da mesma forma, não há variação significativa dos valores de  $C_i$  entre os quatro casos. Qualquer  $n$  aqui é válido, pois não houve variações dos valores calculados.

4) Casos 18 a 21  $\alpha = 180^\circ$



Agora, com as duas aberturas laterais a barlavento, o comportamento não foi tão bom quanto nos casos 14 a 17- $180^\circ$ . No caso da maior abertura lateral a diferença entre  $C_i$  calculado e medido foi de  $0,09$ , não se enquadrando em nenhum  $n$  usual. Para as demais,  $n$  foi um pouco inferior a  $0,5$  com uma diferença muito pequena entre calculados e medidos.

5) Casos 2 a 5  $\alpha = 0^\circ$



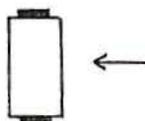
Nestes casos, com a abertura maior a barlavento, os coeficientes medidos igualaram-se aos calculados, tendo o expoente  $n$  ficado entre  $0,5$  e  $0,65$ . Quanto menor a abertura de sotavento, maior o expoente  $n$ .

6) Casos 2 a 5  $\alpha = 180^\circ$



Agora a abertura maior se localiza a sotavento. Nestes casos a variação de  $n$  foi menor ainda, situando-se em torno de  $0,5$ , com uma leve tendência de aumento com a diminuição da área das aberturas.

7) Casos 2 a 5  $\alpha = 90^\circ$



Nestes casos os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer  $n$  e para todos os casos, tendo praticamente se igualado aos  $C_i$  medidos, com uma diferença máxima de 0,03. Qualquer  $n$  é válido nestes casos.

8) Casos 6 a 9  $\alpha = 0^\circ$



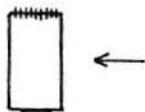
Nestes casos, a diminuição da área a sotavento fez aumentar o expoente  $n$  com um valor máximo de 0,9 (caso 9); para os casos 7 e 8 fica em torno de 0,65. No caso 6 a diferença entre calculados e medido foi de 0,06 não se enquadrando em nenhum  $n$  usual.

9) Casos 6 a 9  $\alpha = 180^\circ$



Agora as aberturas menores estão a barlavento. Os valores medidos alcançam os calculados, com uma leve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas. O expoente  $n$  variou entre 0,5 e 0,65.

10) Casos 6 a 9  $\alpha = 90^\circ$



Os coeficientes medidos praticamente se igualaram aos calculados, em cada caso. O expoente  $n$  tende a 0,5, porém a diferença é tão pequena que qualquer  $n$  pode ser usado nestes casos.

11) Casos 10 a 13  $\alpha = 0^\circ$



Os  $C_i$  medidos se enquadraram nos  $C_i$  calculados dentro dos expoentes usuais. Houve aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas a sotavento, situando-se entre 0,5 e 0,8.

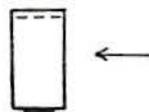
12) Casos 10 a 13  $\alpha = 180^\circ$



Novamente os  $C_i$  calculados coincidem com os medidos, em cada caso. Há um aumento do valor de  $n$  com a diminuição da

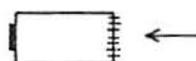
área das aberturas de barlavento, com  $n$  entre 0,5 e 0,75.

13) Casos 10 a 13  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  são iguais, para cada caso. Há boa concordância entre valores calculados e medidos, com uma tendência de fixar-se em torno de 0,5, mas com uma diferença muito pequena, fazendo com que qualquer expoente  $n$  possa ser utilizado, nestes casos.

14) Casos 27 a 30  $\alpha = 0^\circ$



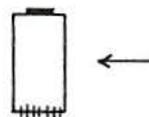
Com a permeabilidade do tipo (b) comandando a barlavento, os  $C_i$  calculados coincidem com os medidos para um valor de  $n$  próximo de 0,9. Não houve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas de sotavento, nestes casos.

15) Casos 27 a 30  $\alpha = 180^\circ$



Agora a abertura tipo (b) dos casos acima está a sotavento e a diminuição na área das aberturas é a barlavento. Novamente o fenômeno se repete:  $n$  aumenta à medida que a área de uma das aberturas diminui. Nos casos 27 e 28 os valores calculados só atingem os medidos para  $n$  inferior a 0,5. Para o caso 29  $n \approx 0,65$  e para o 30  $n \approx 0,71$ .

16) Casos 27 a 30  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  medidos se encaixam bem nos calculados, e têm praticamente o mesmo valor para qualquer  $n$ , caso a caso. Qualquer valor do expoente de escoamento é válido aqui.

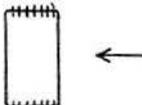
17) Casos 31 a 34  $\alpha = 0^\circ$



Nestes casos parece haver uma tendência de manutenção de  $n$  em torno de 1,0 ou pouco mais. A maior diferença é para o caso 31: 0,10 entre calculados e medido.

18) Casos 31 a 34  $\alpha = 180^\circ$  

No caso 31 (idem 31 anterior), para este novo ensaio, a diferença fica em 0,06. Já nos demais casos agora a lei funciona: com a diminuição da área de barlavento,  $n$  aumenta, ficando entre 0,5 (pouco menor) para o caso 32, e 0,65 para o caso 34.

19) Casos 31 a 34  $\alpha = 90^\circ$  

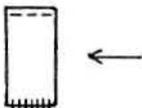
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  são praticamente os mesmos para todos os casos, quase se igualando aos coeficientes medidos. Desta forma, qualquer valor de  $n$  pode ser utilizado nestes casos, com uma diferença máxima de 0,04 entre calculados e medidos.

20) Casos 35 a 38  $\alpha = 0^\circ$  

Os  $C_i$  medidos se enquadram aos calculados nos três últimos casos, com  $n \approx 0,8$  para os casos 36 e 37, e  $n = 1,0$  para o 38. O caso 35 teve os  $C_i$  calculados iguais, para todos os  $n$ , apresentando uma diferença de 0,04 em relação ao medido.

21) Casos 35 a 38  $\alpha = 180^\circ$  

Para os casos 36, 37 e 38 há um aumento de  $n$  quando a área das aberturas a barlavento diminuem, com  $n \approx 0,65$  para o 38,  $n \approx 0,6$  para o 37 e  $n$  pouco inferior a 0,5 para o 36. No caso 35 os calculados com diferentes valores de  $n$  tiveram o mesmo valor, apresentando uma diferença em relação ao medido de 0,08.

22) Casos 35 a 38  $\alpha = 90^\circ$  

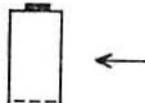
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  têm o mesmo valor para todos os casos. Qualquer valor de  $n$  pode ser utilizado nestes casos. A diferença máxima entre calculados e medidos foi de 0,05, para o caso 35, e 0,02 para os demais.

23) Casos 52 a 55  $\alpha = 0^\circ$  

O expoente  $n$  aumenta com a diminuição da área da abertura de sotavento, chegando a 1,0 para o caso 55. Para o 54  $n \approx 0,9$ , para o 53  $n \approx 0,7$  e qualquer para o 52, já que os calculados são os mesmos, igualando-se ao medido.

24) Casos 52 a 55  $\alpha = 180^\circ$  

Com a diminuição da área de barlavento, há uma tendência de aumento de  $n$ , chegando a um máximo de 0,7 (caso 55) e ficando próximo de 0,5, porém menor, para o caso 53. No caso 52, os  $C_i$  calculados são os mesmos para todos os  $n$ , igualando-se ao medido.

25) Casos 52 a 55  $\alpha = 90^\circ$  

Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram praticamente os mesmos, para cada caso, e também praticamente igualaram-se aos medidos, com uma diferença máxima de 0,04. Portanto, qualquer  $n$  é válido, nestes casos.

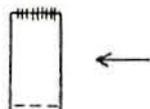
26) Casos 56 a 59  $\alpha = 0^\circ$  

No caso 56 os  $C_i$  calculados foram os mesmos e têm uma diferença em relação ao medido de 0,08. Nos demais casos, a fórmula funciona e  $n$  fica em torno de 0,8, para mais.

27) Casos 56 a 59  $\alpha = 180^\circ$  

Com exceção do primeiro caso (56), houve um aumento do valor de  $n$  com a diminuição da área da abertura de sotavento, chegando a  $\approx 0,8$  para o 59 e pouco mais de 0,5 para o 57. No caso 56 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para todos os valores de  $n$ , apresentando uma diferença em relação ao medido de 0,04.

28) Casos 56 a 59  $\alpha = 90^\circ$



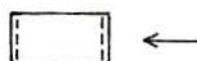
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram exatamente os mesmos, para todos os casos. A diferença máxima em relação aos  $C_i$  medidos foi de 0,05 para o caso 56, 0,03 para o 58, e 0,01 para os demais. Qualquer expoente pode ser usado.

29) Casos 60 a 63  $\alpha = 0^\circ$



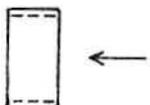
Para os casos 61 a 63 há uma leve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área da abertura de sotavento, tendo  $n$  ficado entre 0,8 e 1,0, aproximadamente. Para o caso 60, os  $C_i$  calculados foram os mesmos, apresentando uma diferença de 0,07 em relação ao medido.

30) Casos 60 a 63  $\alpha = 180^\circ$



O caso 60 é igual ao anterior, mas neste novo ensaio a diferença foi de 0,03, e foi devida à leve flutuação existente no interior do modelo. Para o caso 61  $n$  fica praticamente igual a 0,5 (( que) e quase igual a 0,65 para os outros dois: menor para o 62 e maior para o 63.

31) Casos 60 a 63  $\alpha = 90^\circ$

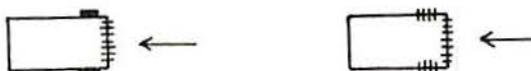


Os  $C_i$  calculados foram exatamente os mesmos para qualquer valor de  $n$ , e para todos os casos. A diferença máxima em relação ao medido foi de 0,04 para o caso 60, 0,02 para o 63, e 0,01 para 61 e 62. Qualquer  $n$  é válido nestes casos.

32) Casos 76 a 79  $\alpha = 0^\circ$



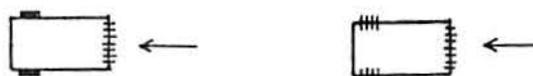
Aqui todas as aberturas têm áreas iguais e estão localizadas nas paredes laterais (já na esteira). Os  $C_i$  calculados com  $n$  diferentes foram efetivamente os mesmos, e praticamente iguais para todos os casos. Para as aberturas tipo (a) a diferença máxima em relação ao medido foi de 0,01, e para tipo (b) 0,03. Qualquer  $n$  pode ser utilizado.

33) Casos 39 a 42  $\alpha = 0^\circ$ 

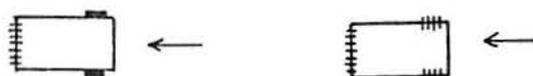
Para o caso 39 os  $C_i$  calculados foram iguais para todos os valores de  $n$ , e a diferença em relação ao medido foi de  $0,08$ . Para os demais, o medido se enquadrou nos calculados com uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas laterais. A variação de  $n$  ficou entre  $\approx 0,58$  para o caso 40 e  $\approx 0,71$  para o 42.

34) Casos 39 a 42  $\alpha = 180^\circ$ 

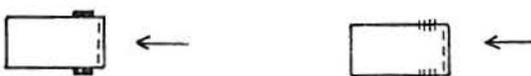
Os  $C_i$  calculados foram praticamente os mesmos para qualquer  $n$ , e quase iguais em todos os casos, também praticamente se igualando aos medidos, com uma diferença máxima de  $0,02$ . Qualquer  $n$  pode ser usado, nestes casos.

35) Casos 43 a 46  $\alpha = 0^\circ$ 

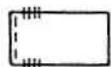
Para o caso 43 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para todos os  $n$ , e a diferença em relação ao medido foi de  $0,06$ . Para o caso 44  $n \approx 0,58$  e para os outros dois  $n \approx 0,8$ , aumentando com a diminuição da área das aberturas laterais.

36) Casos 43 a 46  $\alpha = 180^\circ$ 

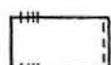
No caso 43 os  $C_i$  calculados foram iguais para diferentes valores de  $n$ , com uma diferença em relação ao medido de  $0,07$ . Para os casos 44 e 45  $n = 0,5$  e para 46  $n = 0,60$ . Houve aumento de  $n$  com a troca do tipo de abertura: de (a) para (b).

37) Casos 64 a 67  $\alpha = 0^\circ$ 

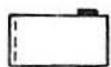
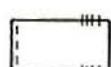
Para o caso 64 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para diferentes valores de  $n$ , com uma diferença de  $0,10$  em relação ao medido. Houve aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas laterais e com a troca do tipo (a) para o (b). O expoente  $n$  foi  $0,5$  (um pouco menor) para o caso 65,  $0,65$  (um pouco menor) para o 66 e  $\approx 0,7$  para o caso 67.

38) Casos 64 a 67  $\alpha = 180^\circ$   

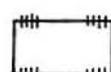
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram os mesmos, apresentando pouquíssima diferença entre os casos, e praticamente igualando-se aos medidos, com uma diferença máxima de 0,02. Qualquer  $n$  pode ser utilizado nestes casos.

39) Casos 68 a 71  $\alpha = 0^\circ$   

Para o caso 68 os  $C_i$  calculados com diversos  $n$  foram iguais, e a diferença em relação ao medido foi de 0,07. Para os demais,  $n$  aumentou com a diminuição da área das aberturas laterais e com a troca do tipo (a) para o (b). Para o caso 69  $n \approx 0,57$ , para o 70  $n \approx 0,8$  e para o 71  $n \approx 1,0$ .

40) Casos 68 a 71  $\alpha = 180^\circ$   

Para o caso 68 os  $C_i$  calculados foram iguais para diferentes valores de  $n$ , sendo a diferença em relação ao coeficiente medido de 0,09. Para o 69  $n$  foi quase igual a 0,5 (< que), para 70 e 71  $n \approx 0,65$  (um pouco menor para 70 e igual para 71). Há confirmação da tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas laterais e troca de tipos de abertura.

41) Casos 22 a 25  $\alpha = 0^\circ$   

O único caso em que houve coincidência entre  $C_i$  calculado e medido foi no caso 25, em que as aberturas são do tipo (b), tendo  $n$  ficado pouco maior que 0,5. No caso 24  $n$  foi menor, mas bem próximo de 0,5 (diferença de 0,04 entre calc. e medido). Nos dois primeiros casos a diferença foi de 0,07, porém acima de 1,0 no 22 e abaixo de 0,5 no 23.

42) Casos 22 a 25  $\alpha = 180^\circ$   

Para todos os casos  $n$  ficou perto de 0,5: para menos no caso 24 (diferença entre calculado e medido de 0,02), para mais no caso 22 ( $n \approx 0,57$ ) e igual nos casos 23 e 25.

43) Casos 47 a 50  $\alpha = 0^\circ$



Para o caso 47  $n$  ficou pouco acima de 1,0 (diferença entre coeficientes 0,02). No 48  $n$  ficou abaixo de 0,5 (diferença de 0,04). Para o 49  $n \approx 0,59$  e para o 50  $n \approx 0,65$ .

44) Casos 47 a 50  $\alpha = 180^\circ$



Há uma leve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas laterais e troca de tipo. Os expoentes ficaram entre 0,5 (47) e 0,65 (50).

45) Casos 72 a 75  $\alpha = 0^\circ$



Para os casos 74 e 75  $n = 0,65$ . Já para os dois primeiros casos, não há coincidência entre um valor calculado e um medido. A diferença mínima foi de 0,07 para o caso 73 com  $n$  inferior a 0,5, e de 0,05 para o caso 72 com  $n$  superior a 1,0.

46) Casos 72 a 75  $\alpha = 180^\circ$



Há uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas laterais. Fica próximo (porém inferior) a 0,5 para o caso 72, próximo (mas superior) a 0,5 no 73, e igual a 0,65 nos casos 74 e 75.

47) Casos 76 a 79  $\alpha = 90^\circ$



Em todos os casos os  $C_c$  calculados foram iguais, e com muito pouca diferença entre os casos. Nos casos intermediários (77 e 78) a diferença em relação ao medido foi de 0,04. Já nos casos 76 e 79 foi de 0,09. Para o caso 79, aberturas tipo (b), o caso é semelhante ao  $31-0^\circ$  e  $180^\circ$ , assim como o comportamento do fenômeno.

48) Casos 72 a 75  $\alpha = 90^\circ$



O coeficiente medido não se enquadra aos calculados nos casos 72 e 73, porém com uma pequena diferença (0,03),

ficando o expoente  $n$  inferior a  $0,5$ . Já para o caso 74  $n \approx 0,54$  e para o 75  $n \approx 0,66$ .

49) Casos 47 a 50  $\alpha = 90^\circ$



O coeficiente medido não coincide com o calculado nos casos 47 e 48, com uma diferença de  $0,02$  no 47 e  $0,01$  no 48, ficando o expoente  $n$  inferior a  $0,5$ . No caso 49  $n$  fica inferior a  $0,65$  com uma diferença de  $0,01$  entre coeficientes; no caso 50,  $n$  fica em torno de  $0,56$ .

50) Casos 22 a 25  $\alpha = 90^\circ$



Todos os  $C_i$  calculados se encaixam com algum medido, com tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das aberturas. O expoente variou entre  $\approx 0,5$ , no 22, e  $0,65$  (pouco superior), no 25.

51) Casos 14 a 17  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados coincidiram com os medidos, em cada caso, com uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas. Para o caso 14,  $n$  ficou um pouco maior que  $0,65$ , para o 15  $n \approx 0,8$ , e pouco menor que  $1,0$  no 17, sendo que para o 16  $n = 1,0$ .

52) Casos 39 a 42  $\alpha = 90^\circ$



Os coeficientes medidos se enquadram nos calculados. Caso 39 teve  $n$  pouco menor que  $0,5$ , pouco superior a  $0,65$  nos casos 40 e 41, e pouco inferior a  $0,65$  no 42. Há alteração no comportamento de  $n$  quando as aberturas trocam de tipo.

53) Casos 64 a 67  $\alpha = 90^\circ$



Semelhante à análise 52: os medidos e calculados se ajustam, e há alteração no comportamento de  $n$  quando acontece a troca dos tipos de abertura. Caso 64 tem  $n$  levemente inferior a  $0,5$ , igual a  $0,65$  para 65 e 66, e igual a  $0,5$  para o 67.

54) Casos 18 a 21  $\alpha = 90^\circ$



Há uma levíssima tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas e este aumento ocorre de fato quando há troca de tipos de abertura. Para os casos 18 e 19,  $n$  é inferior a 0,5 com diferenças de 0,02 (18) e 0,01 (19) em relação ao coeficiente medido; para o caso 20  $n = 0,5$  e para o 21  $n \approx 0,8$ .

55) Casos 43 a 46  $\alpha = 90^\circ$



Desta vez, com a abertura maior sendo do tipo (b),  $n$  ficou sempre em torno de 0,5, sendo que para o caso 43 a diferença não é tão pequena: 0,09 em relação ao coeficiente medido. O expoente ficou pouco acima de 0,5 nos casos 44 e 46, e igual a 0,5 no 45.

56) Casos 68 a 71  $\alpha = 90^\circ$



Para o caso 68 (com comportamento semelhante ao seu correspondente na análise acima), a menor diferença foi de 0,08 entre calculado e medido, para  $n$  menor que 0,5. Para o 69  $n$  se aproxima de 0,5 (pouco menor), no 70 fica um pouco acima deste valor, e no 71 se aproxima de 0,65, ficando pouco abaixo deste valor. Deve ser notado que os casos englobados nesta análise são casos intermediários entre os casos englobados pelas análises 54 e 55, e tiveram um comportamento coerente.

A seguir vêm as análises correspondentes ao outro tipo de vento. A discussão é feita ao final da mesma.

5.2.2 - VENTO UNIFORME E SUAVE1) Casos 14 a 17  $\alpha = 0^\circ$ 

Para o caso 14 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para todos os valores de  $n$  e não coincidem com o medido, apresentando uma diferença de 0,11. Também para o 15 não há coincidência, com  $n$  ficando abaixo de 0,5 e uma diferença entre medido e calculado de 0,07. Já para as aberturas menores (casos 16 e 17),  $n$  ficou em 0,5 para o 16, e 0,57 para o 17. Houve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas e troca do tipo (a) para (b).

2) Casos 18 a 21  $\alpha = 0^\circ$ 

O fenômeno teve a mesma seqüência, mas os valores medidos se enquadraram melhor aos calculados pela fórmula. Para o 18 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer valor de  $n$ , com uma diferença em relação ao medido de 0,10. Já para o 19,  $n$  ficou abaixo de 0,5 com uma diferença de 0,04 entre calculado e medido. Para o 20  $n = 0,65$  e para o 21  $n \approx 0,75$ .

3) Casos 14 a 17  $\alpha = 180^\circ$ 

Com as aberturas bem imersas na esteira, os  $C_i$  medidos se igualaram aos calculados (que foram iguais para todos os  $n$ ), com uma diferença máxima de 0,01 entre medidos e calculados. Para estes casos, qualquer valor de  $n$  pode ser utilizado.

4) Casos 18 a 21  $\alpha = 180^\circ$ 

Agora com as duas aberturas laterais a barlavento, o comportamento não foi tão bom quanto na análise anterior. Houve a tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas laterais, mas  $C_i$  calculado não atingiu o medido em nenhum caso, mas ficando bem próximo (porém abaixo) de 0,5 nos casos 20 e 21, com uma diferença de 0,02 entre calculados e

medidos, nos dois casos. Para o 18 e 19  $n < 0,5$  com diferença entre coeficientes de  $0,12$  e  $0,06$ , respectivamente.

5) Casos 2 a 5  $\alpha = 0^\circ$



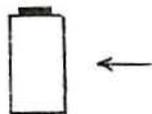
No caso 2 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para diferentes valores de  $n$  e se igualaram ao medido. Para o caso 3  $n = 0,5$ ; para o 4  $n > 1,0$  (diferença entre  $C_i$  de  $0,05$ ) e para o 5  $n$  levemente menor que  $1,0$ .

6) Casos 2 a 5  $\alpha = 180^\circ$



Agora a abertura maior se localiza a sotavento, e a variação nas áreas é a barlavento. Para o caso 2,  $C_i$  calculados para diversos  $n$  foram iguais, igualando-se ao medido. Já para o 3,  $n < 0,5$  com uma diferença de  $0,03$  ( $C_i$ ); para o 4  $n < 2$  com diferença de  $0,02$  e  $n = 0,5$  para o caso 5.

7) Casos 2 a 5  $\alpha = 90^\circ$



Nestes casos os  $C_i$  calculados com diferentes valores do expoente  $n$  foram os mesmos, praticamente se igualando aos medidos, com uma diferença máxima de  $0,03$ . Qualquer  $n$  pode ser usado nestes casos.

8) Casos 6 a 9  $\alpha = 0^\circ$

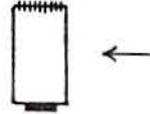


Nestes casos, com a diminuição da área da abertura do tipo (b) a sotavento, e com exceção do caso 6, houve tendência de aumento de  $n$ , que variou entre  $0,65$  (caso 7) e  $1,0$  (caso 9). Para o caso 6 a diferença entre calculados e medidos foi de  $0,05$ .

9) Casos 6 a 9  $\alpha = 180^\circ$



Agora as aberturas menores estão a barlavento. Para o caso 6 houve coincidência entre calculados e medido (diferença de  $0,01$ ). Para os demais,  $n$  foi sempre menor que  $0,5$ , porém quase igual, com uma diferença máxima de  $0,02$  entre  $C_i$ .

10) Casos 6 a 9  $\alpha = 90^\circ$ 

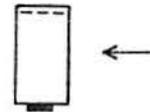
Os coeficientes calculados com diferentes valores de  $n$  foram praticamente iguais para cada caso e quase atingem os medidos, com uma diferença pequena, que teve o valor máximo de 0,05 para o caso 8, e  $\leq 0,03$  para os demais.

11) Casos 10 a 13  $\alpha = 0^\circ$ 

Para o caso 10 os  $C_i$  calculados são iguais para qualquer valor de  $n$  e têm uma diferença em relação ao  $C_i$  medido de 0,03. Quando a abertura de sotavento começa a diminuir,  $n$  começa a aumentar indo de 0,57, para o caso 11, até praticamente 1,0 para o 13.

12) Casos 10 a 13  $\alpha = 180^\circ$ 

Os  $C_i$  calculados só coincidem com o medido no caso 13, em que  $n \approx 0,57$ . Nos demais,  $n$  fica abaixo de 0,5, com uma diferença entre coeficientes calculados e medidos de 0,02 para o caso 12, 0,03 para o 11 e 0,02 para o 10.

13) Casos 10 a 13  $\alpha = 90^\circ$ 

Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  são praticamente iguais, quase atingindo os medidos com uma diferença máxima de 0,04 para o caso 13, com  $n = 1,0$ . Qualquer  $n$  é válido nestes casos.

14) Casos 27 a 30  $\alpha = 0^\circ$ 

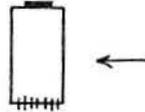
Com a abertura do tipo (b) a barlavento fixa, houve tendência de aumento de  $n$  à medida que a área da abertura de sotavento diminuía. Para o caso 27,  $n$  é qualquer, para o 28  $n \approx 0,65$ , para o 29 e 30,  $n \approx 0,7$ .

15) Casos 27 a 30  $\alpha = 180^\circ$



Agora a abertura tipo (b) está a sotavento, invariável. Para o caso 27, a diferença entre  $C_i$  calculados e medido é de 0,05 (para qualquer  $n$ ). Quando a abertura de barlavento começa a diminuir,  $n$  aumenta. Fica pouco abaixo de 0,5 para o 28, pouco acima deste valor para o 29 e 0,65 para o caso 30.

16) Casos 27 a 30  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram praticamente os mesmos, também praticamente igualando os  $C_i$  medidos com uma diferença máxima de 0,02. Qualquer  $n$  pode ser utilizado, nestes casos.

17) Casos 31 a 34  $\alpha = 0^\circ$



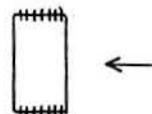
Para o caso 31  $C_i$  calculados foram iguais para qualquer valor de  $n$ , tendo uma diferença em relação ao medido de 0,08. Quando a área da abertura de sotavento passa a ser igual ou menor que a metade da área da abertura de barlavento, a fórmula funciona bem, mas sem tendência definida. Para o caso 32,  $n = 1,0$ ; para o 33  $n \approx 0,8$  e volta a ficar perto de 1,0 (pouco menor) para o 34.

18) Casos 31 a 34  $\alpha = 180^\circ$



No caso 31 (igual ao anterior) foi feito um novo teste e a diferença em relação ao medido caiu um pouco: 0,05. Agora com a área de barlavento sofrendo redução, há tendência de aumento de  $n$ . Este variou de 0,05 (pouco inferior), para o caso 32, até perto de 0,65, para o caso 34.

19) Casos 31 a 34  $\alpha = 90^\circ$



Para todos os casos  $C_i$  calculados foram os mesmos para todos os valores de  $n$  utilizados. Pode-se considerar que os  $C_i$  medidos coincidem com os calculados, já que a diferença

máxima foi de 0,05, para o caso 31. Qualquer  $n$  é válido nestes casos.

20) Casos 35 a 38  $\alpha = 0^\circ$



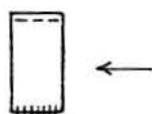
Com exceção do caso 35, que teve o mesmo  $n$  para todos os  $C_i$  calculados e apresentou uma diferença em relação ao medido de 0,07, os demais se enquadraram na fórmula, com  $n$  situando-se entre 0,8 e 1,0, e crescendo à medida que a área de sotavento diminuía.

21) Casos 35 a 38  $\alpha = 180^\circ$



Com a abertura tipo (b) a sotavento invariável, houve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área da abertura de barlavento a partir do caso de abertura dominante com  $N \geq 2$ . O enquadramento aos valores obtidos pela fórmula foi bom em todos os casos. Para o 35 todos os  $n$  são iguais, com uma diferença entre  $C_i$  calculados e medido de 0,02. Para o 36,  $n$  pouco menor que 0,5, pouco maior que isto no 37, e  $\approx 0,57$  no 38.

22) Casos 35 a 38  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados são iguais para todos os  $n$ , praticamente igualando os  $C_i$  medidos, com uma diferença máxima de 0,05 (caso 35).

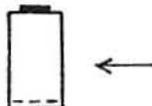
23) Casos 52 a 55  $\alpha = 0^\circ$



Os  $C_i$  calculados coincidem com os medidos, com um bom funcionamento da fórmula para todos os casos. No caso 52  $n$  fica levemente abaixo de 0,5 com praticamente nenhuma diferença em relação ao calculado (0,02). Para os demais casos,  $n$  fica entre 0,5 e 0,65, sem alcançar nenhum destes valores.

24) Casos 52 a 55  $\alpha = 180^\circ$  

Para o caso 52 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer valor de  $n$ , praticamente igualando-se ao medido com uma diferença de 0,03. Para o 53  $n$  ficou levemente abaixo de 0,5, e para os dois casos restantes  $n$  foi exatamente 0,5.

25) Casos 52 a 55  $\alpha = 90^\circ$  

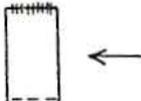
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  são iguais, para cada caso, praticamente igualando-se aos  $C_i$  medidos. A diferença máxima foi de 0,02, para o caso 55. Qualquer  $n$  é válido nestes casos.

26) Casos 56 a 59  $\alpha = 0^\circ$  

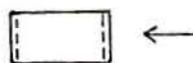
Para o caso 56 os  $C_i$  calculados são os mesmos para qualquer valor de  $n$ , praticamente atingindo o medido, com uma diferença de 0,02. Já nos outros três, parece haver uma tendência de diminuição de  $n$  com a diminuição da área de sotavento:  $n \approx 0,72$  no 57,  $n \approx 0,66$  no 58 e  $n \approx 0,57$  no 59.

27) Casos 56 a 59  $\alpha = 180^\circ$  

No caso 56 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer  $n$ , e têm uma diferença em relação ao medido de 0,07. Já para o 57  $n$  ficou pouco abaixo de 0,5 com uma diferença entre medido e calculado de 0,02. Para os dois restantes,  $n$  foi levemente maior que 0,5 no 58, e igual a 0,57 no 59, revelando uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área da abertura de sotavento.

28) Casos 56 a 59  $\alpha = 90^\circ$  

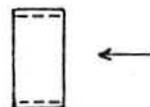
Os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram praticamente os mesmos para todos os casos, tendo ficado bem próximos dos medidos, com uma diferença máxima de 0,05 (caso 56). Qualquer  $n$  pode ser utilizado nestes casos.

29) Casos 60 a 63  $\alpha = 0^\circ$ 

No caso 60, os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer  $n$ , praticamente atingindo o valor medido (diferença em relação ao medido de 0,01). Para os demais,  $n$  foi praticamente 0,65, com uma diferença entre calculados e medidos de 0,01 para todos os casos.

30) Casos 60 a 63  $\alpha = 180^\circ$ 

No caso 60, por ser idêntico ao acima, o comportamento é o mesmo, só que a diferença máxima agora neste ensaio foi de 0,02. Há uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área da abertura de barlavento, a partir do momento em que a abertura dominante é maior ou igual ao dobro da outra. Para o caso 61,  $n$  pouco menor que 0,5, com uma diferença entre  $C_i$  de 0,02; para o 62  $n$  praticamente 0,5, e para o 63,  $n = 0,57$ .

31) Casos 60 a 63  $\alpha = 90^\circ$ 

Os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer valor de  $n$ , para cada caso. Há um ótimo enquadramento entre valores medidos e calculados, com uma diferença máxima de 0,04 (caso 60).

32) Casos 76 a 79  $\alpha = 0^\circ$ 

Os  $C_i$  calculados são os mesmos para diferentes valores de  $n$ , e praticamente os mesmos para todos os casos. Quase se igualam aos medidos, com uma diferença de 0,04 (casos 78 e 79). Interessante é o fato de que, apesar dos valores calculados serem praticamente os mesmos, os medidos vão aumentando levemente com a diminuição das áreas das aberturas.

33) Casos 39 a 42  $\alpha = 0^\circ$ 

Para o caso 39 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer  $n$ , apresentando uma diferença em relação ao medido de

0,07. Já quando a abertura de barlavento passa a ser o dobro (ou mais) das laterais (casos 40 a 42), os medidos se enquadram aos calculados e há uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas laterais (e levemente quando há troca de tipo (a) para (b)). Para o caso 40,  $n = 0,5$ ; para o 41 é levemente menor que 0,65, atingindo este valor no caso 42.

34) Casos 39 a 42  $\alpha = 180^\circ$



Com todas as aberturas a sotavento e bem mergulhadas na esteira, houve coincidência total entre coeficientes calculados e medidos, sendo que os calculados com diferentes valores de  $n$  foram os mesmos para cada caso, e praticamente os mesmos para todos os casos (diferença máxima de 0,02). Qualquer  $n$  pode ser usado nestes casos.

35) Casos 43 a 46  $\alpha = 0^\circ$



Para o caso 43 os  $C_i$  calculados são os mesmos para qualquer  $n$  e apresentam uma diferença de 0,07 em relação ao medido. Quando a área das aberturas de sotavento passa a ser metade ou menos (casos 44 a 46) do que a área de barlavento, há um enquadramento dos medidos nos calculados, com uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área e com a troca do tipo de abertura. Para o caso 44,  $n$  pouco maior que 0,5, para o 45  $n \approx 0,8$  e para o 46  $n \approx 0,9$ .

36) Casos 43 a 46  $\alpha = 180^\circ$



Para o caso 43 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para todos os valores de  $n$ , com uma diferença em relação ao medido de 0,08. Já a partir do 44 os valores medidos já se enquadram aos calculados, tendo  $n$  ficado, neste caso, levemente maior que 0,5; nos outros dois,  $n = 0,65$ .

37) Casos 64 a 67  $\alpha = 0^\circ$



Para o caso 64 os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram iguais, apresentando uma diferença em

relação ao medido de 0,13. A partir do caso 65, há um enquadramento dos medidos nos valores dados pela fórmula, e uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas laterais e troca de tipo. Para o caso 65  $n < 0,65$  (diferença de 0,03 entre  $C_i$ ), para o 66  $n = 0,5$  e para o 67  $n \approx 0,56$ .

38) Casos 64 a 67  $\alpha = 180^\circ$



Os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer valor de  $n$ , tendo praticamente se igualado aos coeficientes medidos com uma diferença máxima de 0,02 (caso 66). Nestes casos (com todas as aberturas bem mergulhadas na esteira e bem a sotavento), qualquer valor de  $n$  pode ser utilizado.

39) Casos 68 a 71  $\alpha = 0^\circ$



Para o caso 68 os  $C_i$  calculados foram os mesmos para diferentes valores de  $n$ , tendo apresentado uma diferença de 0,11 em relação ao coeficiente medido. A partir da diminuição das áreas das aberturas laterais, a fórmula começa a funcionar bem, com  $n$  aumentando de valor. Para o caso 69  $n < 0,5$  (diferença de 0,03 entre  $C_i$ ), para o 70  $n = 0,5$ , e para o 71  $n$  praticamente igual a 0,65.

40) Casos 68 a 71  $\alpha = 180^\circ$



Para o caso 68 os  $C_i$  calculados com diferentes valores de  $n$  foram os mesmos, com uma diferença em relação ao medido de 0,08. A partir do caso 69, há enquadramento do valor medido aos calculados, com  $n$  aumentando à medida que a área das aberturas laterais diminuía. Para o caso 69  $n = 0,65$ , para o 71  $n = 0,65$  e levemente maior que isto no 71.

41) Casos 22 a 25  $\alpha = 0^\circ$



O único caso em que houve coincidência entre  $C_i$  calculados e medidos foi no 25, em que  $n$  ficou levemente inferior a 0,5. No 24  $n$  também foi menor que 0,5, mas com uma

diferença de 0,05 entre calculado e medido. No 23 a fórmula tem um comportamento estranho, sem tendência definida, e o mais próximo do medido é obtido com  $n = 0,6$ , com uma diferença de 0,11. Para o 22  $n$  é maior que 1,0, com uma diferença de 0,04 entre coeficientes (calculado e medido).

42) Casos 22 a 25  $\alpha = 180^\circ$



Em todos os casos  $n$  é praticamente igual a 0,5. Em alguns exatamente, em outros levemente menor, com uma diferença máxima entre  $C_i$  calculado e medido de 0,01.

43) Casos 47 a 50  $\alpha = 0^\circ$



Há coincidência entre  $C_i$  calculados e medidos somente nos casos 49 e 50 (em que a soma das áreas das aberturas laterais é igual ou inferior à metade da área da abertura de barlavento). Para o caso 49  $n$  é praticamente igual a 0,5 e para o 50  $n = 0,65$ . Já para o caso 47,  $n > 1,0$  com uma diferença entre coeficiente calculado e medido de 0,06; para o 48  $n$  inferior a 0,5 com diferença de 0,07 entre  $C_i$ .

44) Casos 47 a 50  $\alpha = 180^\circ$



Com todas as aberturas na esteira, houve um bom funcionamento da fórmula e uma tendência de crescimento do valor de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas laterais. Para o caso 47  $n$  é praticamente igual a 0,5, para o 48  $n = 0,65$  e para os casos 49 e 50  $n$  pouco superior a 0,65.

45) Casos 72 a 75  $\alpha = 0^\circ$



Só há coincidência entre coeficiente calculado e coeficiente medido no caso 75, em que  $n$  é pouco superior a 0,5 (diferença de 0,01). Para o caso 74  $n$  se aproxima de 0,5, ficando abaixo disso, com uma diferença entre  $C_i$  de 0,04. Já para o 73 a menor diferença é de 0,10 para  $n < 0,5$ , e para o 72 os  $C_i$  calculados são os mesmos para qualquer  $n$ , com diferença em relação ao medido de 0,08.

46) Casos 72 a 75  $\alpha = 180^\circ$



Com todas as aberturas na esteira houve coincidência entre calculados e medidos, com uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição das áreas das aberturas laterais. Para o caso 72  $n = 0,5$ , para o 73  $n$  é praticamente igual a  $0,65$  (pouco menor), assim como nos casos 74 e 75, com  $n$  pouco superior a este valor.

47) Casos 76 a 79  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados foram os mesmos para qualquer valor de  $n$ , para cada caso. Desta vez a diferença entre calculados e medidos não foi tão grande como no caso do vento turbulento, atingindo aqui um máximo de  $0,05$  (casos 78 e 79). No caso 79 houve inversão de sinal entre calculados e medido.

48) Casos 72 a 75  $\alpha = 90^\circ$



Houve uma leve tendência de aumento do expoente  $n$  com a diminuição da área das aberturas das paredes laterais. Para os casos 72 e 73,  $n$  ficou abaixo de  $0,5$ , com uma diferença de  $0,03$  entre  $C_i$  medidos e calculados. Para os casos 74 e 75,  $n$  foi pouco menor que  $0,65$ , com uma diferença entre coeficientes medidos e calculados de  $0,01$ .

49) Casos 47 a 50  $\alpha = 90^\circ$



Também há uma leve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas. Para o caso 47,  $n = 0,5$ , para o 48 é praticamente  $0,5$ , para o 49  $n = 0,65$ , e pouco superior a este valor no caso 50.

50) Casos 22 a 25  $\alpha = 90^\circ$



Também há a tendência observada nas duas análises anteriores. Para o caso 22  $n = 0,65$ , para o 23  $n \approx 0,9$  e para os casos 24 e 25  $n$  é praticamente igual a  $1,0$  (levemente menor).

51) Casos 14 a 17  $\alpha = 90^\circ$



Há uma leve tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas das paredes laterais, mas com  $n$  ficando em torno de  $1,0$ , para todos os casos.

52) Casos 39 a 42  $\alpha = 90^\circ$



Os  $C_i$  calculados coincidem com os medidos com  $n$  situando-se entre  $0,65$  e  $1,0$ , sem uma tendência definida. A fórmula, nestes casos, teve um bom funcionamento.

53) Casos 64 a 67  $\alpha = 90^\circ$



Semelhante à análise anterior, nestes casos os coeficientes calculados também coincidem com os medidos, tendo  $n$  variado entre  $0,5$  e pouco mais de  $0,65$ , sem tendência definida. A fórmula também teve um bom funcionamento.

54) Casos 18 a 21  $\alpha = 90^\circ$



Há nitidamente uma tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas das paredes laterais. Para o caso 18  $n < 0,5$  com uma diferença entre calculados e medidos de  $0,02$ ; para o 19  $n \approx 0,8$ , para o caso 20  $n = 1,0$ , e pouco maior que este valor no 21.

55) Casos 43 a 46  $\alpha = 90^\circ$



Também nestes casos há tendência de aumento de  $n$  com a diminuição da área das aberturas. Para o caso 43  $n < 0,5$  com uma diferença entre  $C_i$  de  $0,08$ . A partir do caso 44 há coincidência entre calculados e medidos com  $n \approx 0,6$ , neste caso. Para o 45  $n = 0,65$  e pouco superior a este valor no 46.

56) Casos 68 a 71  $\alpha = 90^\circ$



Em conformidade com as duas análises anteriores (casos semelhantes), há tendência de aumento de  $n$  com a

diminuição da área das aberturas laterais. Para o caso 68,  $n$  é menor que 0,5 com uma diferença de 0,08. No caso 69,  $n$  é levemente superior a 0,5, e para os casos 70 e 71  $n = 0,65$ .

Constata-se, das análises acima (cada análise engloba 4 casos), que:

#### Vento turbulento e deslizante

\*\*\* Nos casos englobados pelas análises 1, 2, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 33, 35, 37, 39, 41, 43 e 45, há sempre uma abertura a barlavento sofrendo incidência direta do vento, sendo que a(s) outra(s) encontra(m)-se em sucção. Nestes casos,  $C_i$  é extremamente sensível a qualquer variação relativa nas áreas das aberturas (tanto a barlavento como a sotavento). Além disso, em um grande número de casos, a fórmula usual só passa a funcionar bem quando a área de uma das aberturas (ou sofrendo incidência direta, ou em sucção) for o dobro ou mais que a soma das áreas das outras aberturas. Ou seja, a fórmula funciona sempre que existir uma abertura dominante com área igual ou maior que o dobro da soma das demais. Para alguns casos, esta condição não é tão necessária; exemplos disto são as análises 48, 49, 50 e 54. Para as análises 55 e 56, a lei da abertura dominante passa a funcionar.

\*\*\* Os fenômenos descritos acima também são notados nas análises 4, 36 e 40, em que as duas aberturas laterais encontram-se bem próximas às quinas de barlavento, nas zonas de altas sucções externas, e a outra abertura localiza-se no oitão, a sotavento. Com a variação relativa entre as áreas  $C_i$  também responde de maneira expressiva, assim como também é válida a lei da abertura dominante.

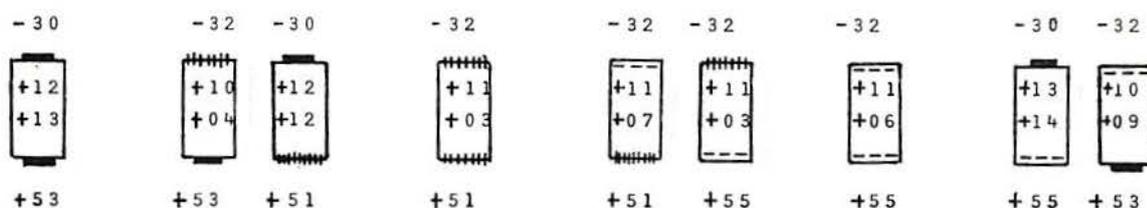
\*\*\* Quando as aberturas encontram-se bem mergulhadas na esteira, que são os casos englobados pelas análises 3, 34 e 38, em que as aberturas estão localizadas bem a sotavento (oitão e paredes laterais), há uma constância da pressão interna para

uma variação relativa entre as áreas das aberturas. O  $C_v$  praticamente não sofre alteração com esta variação relativa. Além disso, os  $C_v$  calculados são os mesmos para qualquer valor de  $n$ , o que significa que qualquer valor do expoente de escoamento pode ser usado nestes casos. É de ressaltar, porém, que um valor intermediário, como  $n = 0,65$ , é sempre mais prudente, pois evita os riscos da utilização de valores extremos.

\*\*\* Já os casos englobados pelas análises 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28 e 31 têm em comum o fato de possuírem somente aberturas localizadas nos oitões, e ângulo de incidência do vento de  $90^\circ$ , ou seja, direção do vento paralela a estas aberturas. Algumas aberturas estão disseminadas por todo o oitão, tipos (b) e (c), e a do tipo (a) bem no centro. Ou seja: uma terça parte das aberturas tipo (b) e (c) encontra-se em zonas de grandes picos de sucção, próximos às quinas de barlavento. Ocorre que, para uma variação relativa entre as áreas das aberturas, não há resposta significativa em termos de  $C_v$ . Nota-se uma pequena diferença (máximo de 0,05 em termos de coeficientes) somente nos casos em que uma parte das aberturas localiza-se próxima às quinas de barlavento, diminuindo à medida que as respectivas áreas também diminuem.

Em termos do expoente  $n$ , para qualquer valor que se utilize, os  $C_v$  calculados são praticamente os mesmos, para cada caso. Nestes termos, qualquer  $n$  é passível de utilização, com a ressalva de que um valor intermediário ( $n = 0,65$ ) é sempre mais prudente, pois evita os riscos da utilização de valores extremos, como já mencionado acima.

\*\*\* Muito interessante é o que acontece nos casos 2, 6, 31, 52, 56 e 60 com  $\alpha = 0^\circ$  e  $180^\circ$ , ilustrados na figura abaixo:



Todas as aberturas têm a mesma área. No exterior do modelo são dados os valores de  $100C_e$  para a abertura

correspondente; dentro são dados os valores de  $100C_L$  (na parte de cima o calculado e abaixo o medido). Note-se que os casos mais problemáticos (embora com nenhuma diferença absurda) foram aqueles em que a abertura tipo (b), permeabilidade disseminada, estava na parede de sotavento. A diferença entre os  $C_L$  calculados e medidos é maior nestes casos. Nota-se um fenômeno interessante: o ar que entra mais facilmente por uma abertura tipo (a), ou mesmo tipo (c), encontra dificuldade em sair tão facilmente quanto entrou. O fenômeno também é levemente notado para abertura tipo (c) a sotavento. Isto já não acontece quando a situação se inverte, ou seja, quando a abertura com permeabilidade disseminada está a barlavento.

Mais interessante é o fato de que, quando há uma diminuição da área de uma das aberturas, há uma tendência de aumento de  $n$ , com a fórmula funcionando novamente para abertura dominante com  $N \geq 2$ . Apenas nos casos 31, 32, 33 e 34- $0^\circ$ , a diminuição da área das aberturas não causou alteração no valor do expoente, ficando este em torno de 1,0, um pouco acima.

\*\*\* Foi constatado um fenômeno extremamente interessante para os casos com abertura dominante a barlavento e recebendo incidência direta do vento. Havia nestes casos uma oscilação no líquido das colunas manométricas, sendo esta oscilação igual para todas as colunas (todos os pontos), indicando uma flutuação na P.I. Esta flutuação era mais forte no caso de somente uma abertura a barlavento, e diminuía à medida que surgiam e aumentavam as aberturas laterais ou de sotavento. Também para o caso da abertura dominante de barlavento do tipo (b), esta flutuação foi bem pequena. O mais interessante é que estas oscilações ocorreram para os dois tipos de vento, e aproximadamente na mesma intensidade. Isto elimina a hipótese de flutuação devida direta e exclusivamente à turbulência do vento incidente, pois ocorreu no escoamento suave. Uma possível explicação é que talvez estejam ocorrendo as conhecidas oscilações de Helmholtz da acústica, que já foram constatadas em edificações com somente uma abertura por Liu e Rhee<sup>41</sup>, mesmo para escoamento suave e uniforme.

### Vento suave e uniforme

\*\*\* De uma maneira geral, as mesmas constatações feitas para o vento turbulento têm o mesmo andamento quando se trata de escoamento suave, ao menos para pressões médias, com certas ressalvas. A primeira delas é quanto aos valores. Obviamente os  $C_i$  encontrados para um tipo de vento não são os mesmos que para o outro, no caso correspondente. Também, e mais importante, o enquadramento na fórmula usual é melhor para o caso do vento turbulento. Para o escoamento suave a dispersão em torno dos valores de  $n$  é surpreendentemente maior, e não tendem a nenhum valor geral, como pode ser constatado no caso turbulento ( $n \approx 0,65$ ). No caso do vento uniforme, estabelecer um valor para o expoente  $n$  é mais delicado, devido à sua enorme variação. Para fins de engenharia estrutural, este caso não é de interesse prático, mas pode ser para uma possível aplicação em problemas de ventilação. Sendo assim, a adoção de um valor de  $n$  igual ao do vento turbulento (ou um pouco maior), serve como uma primeira indicação. Porém, são necessários estudos mais específicos nesta área, inclusive com ensaios em velocidades mais baixas, como ocorre no caso de brisas naturais.

### Constatação adicional

\*\*\* Nos casos 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 46, 47, 48, 49, 50, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, para  $\alpha = 180^\circ$ , no caso do vento turbulento, que é o que interessa para fins estruturais, o comportamento de  $n$  foi diferente dos outros casos e não conduziu ao valor mais nocivo para  $n = 0,5$  (como diz Cook<sup>17</sup> sempre acontecer), mas sim para  $n = 1,0$ . É justamente por estes casos que um valor extremo para  $n$  não é aconselhável. E mesmo um valor "mais nocivo" não é o mesmo para toda a edificação: se é para a parede de barlavento, não é para as demais e vice-versa, para exemplificar. Uma observação, porém, é muito importante neste ponto: em todos os casos analisados, em que o coeficiente de forma  $C_i$  era positivo,  $n$  sempre estabeleceu o maior valor deste coeficiente quando era igual a 0,5 (os piores acidentes são causados por uma sobrepressão interna, conforme visto no capítulo 1).

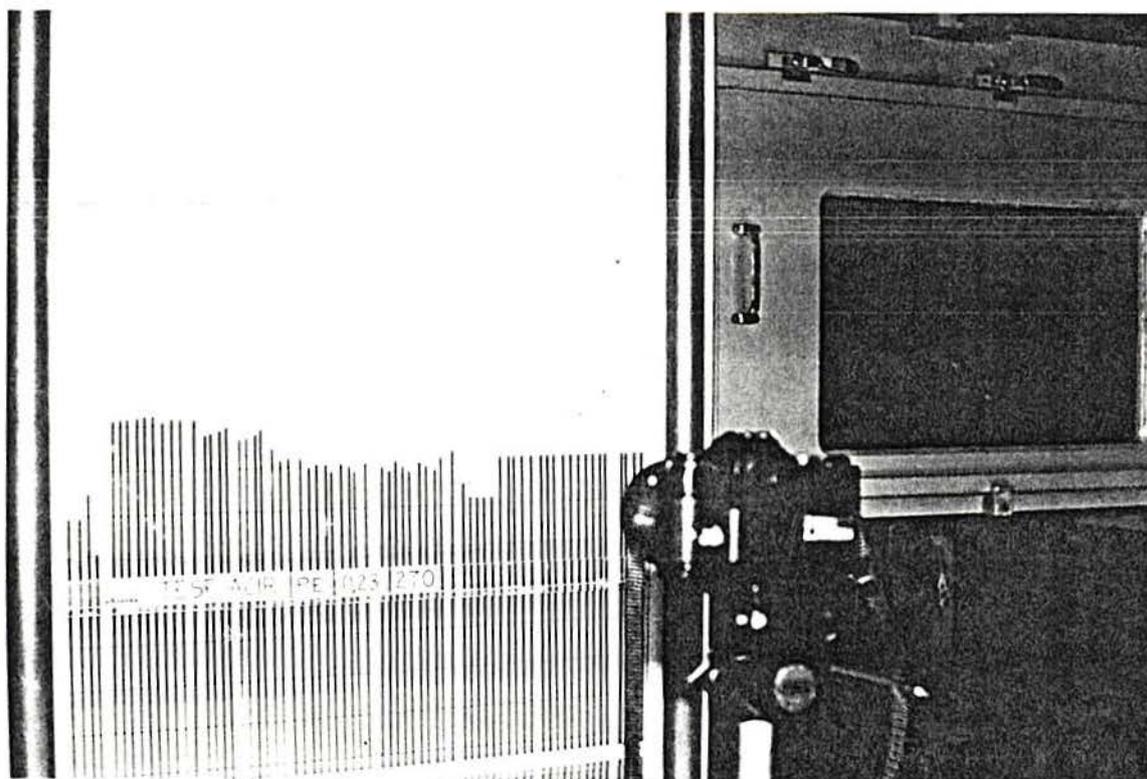
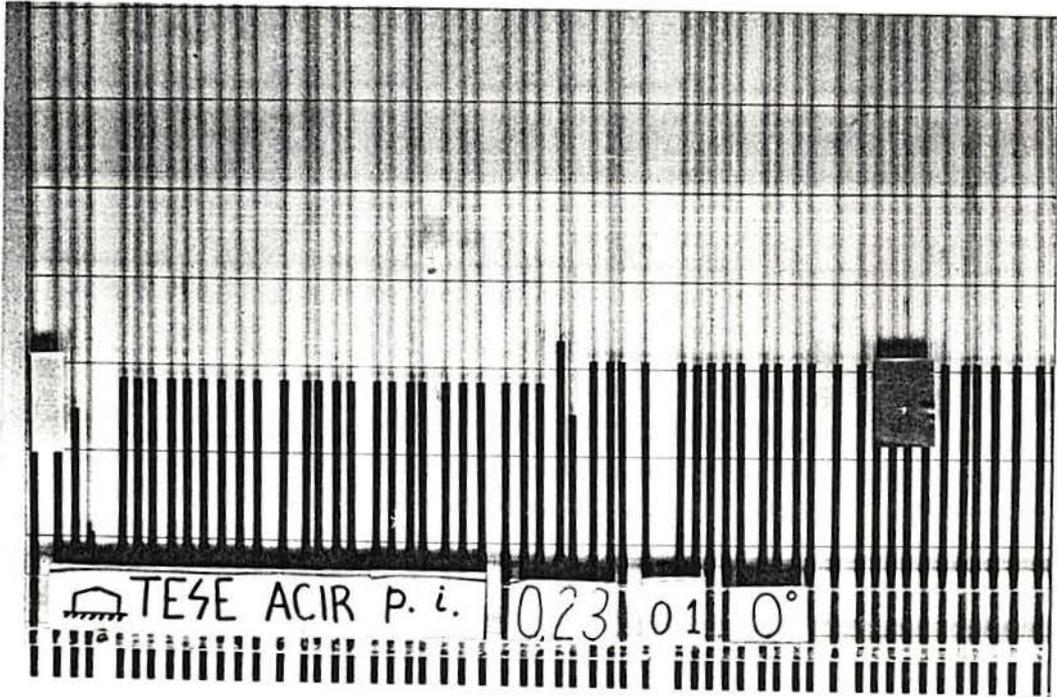


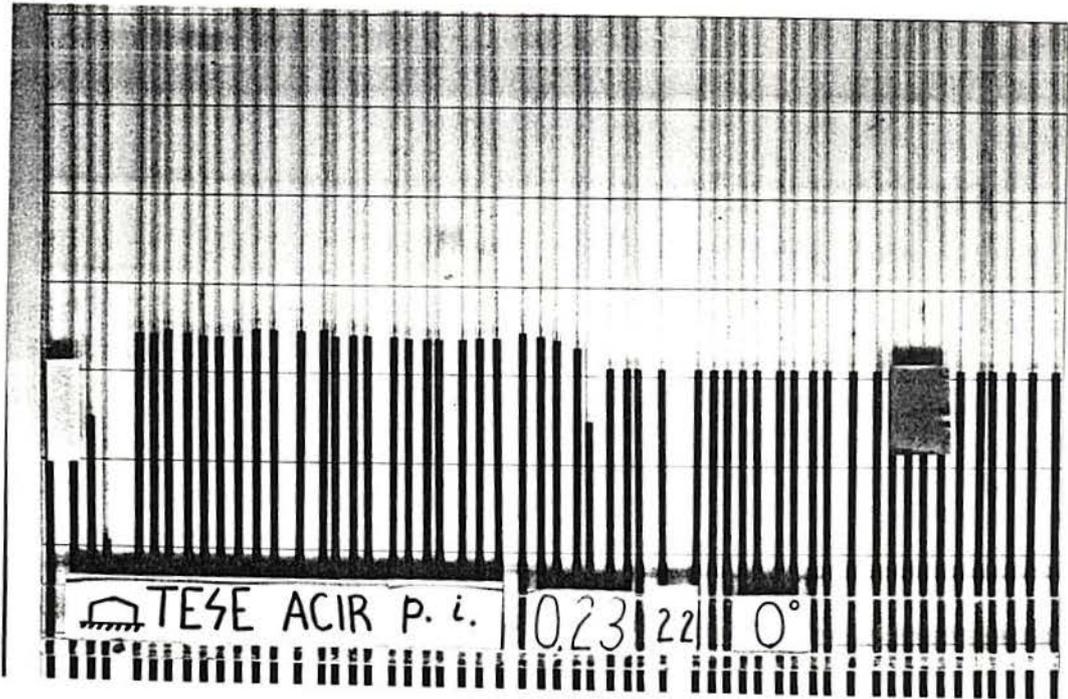
Fig. 5.3 - Registro fotográfico das P.E. para vento turbulento



Fig. 5.4 - Registro fotográfico das P.I. para vento suave  
Caso 66-90°  $c_{pi}$  sem variação espacial.



(a) Caso 1-0°:  $c_{pi}$  sem variação espacial.



(b) Caso 22-0°:  $c_{pi}$  com variação espacial.

Fig. 5.5 - Registro fotográfico das P.I. para vento turbulento.

## 6 - COMENTÁRIOS FINAIS

### 6.1 - Conclusões

Em primeiro lugar deve-se destacar que não existe um único valor do expoente  $n$  que satisfaça a todos os casos. O comportamento diferente, conforme as aberturas estavam localizadas na esteira ou sofrendo incidência direta do vento, pode ser parcialmente explicado pelo fato de estar a parede de barlavento (a qual sofre incidência direta do vento) com uma distribuição de pressões que é fundamentalmente dependente da estrutura deste vento incidente, enquanto as zonas em sucção são principalmente afetadas por um escoamento secundário, mais localizado, que inclui a turbulência adicional produzida a partir da separação<sup>56</sup>.

De qualquer maneira, mesmo não existindo este valor único, a fórmula mais usual do tipo  $Q = K A (\Delta p)^n$  mostrou-se eficiente sempre que existia uma abertura dominante com  $N \geq 2$ , sendo que para  $N = 1$  em apenas alguns casos. O coeficiente  $K$  foi considerado constante e  $n$  representou os efeitos das diversas variações estudadas. Foi constatado que  $n$  tende a aumentar com o aumento da velocidade de escoamento através da edificação. O expoente de escoamento que mais se aproxima da maioria dos casos, sem apresentar uma diferença muito alta entre  $C_d$  calculados e medidos, é um valor em torno de 0,65, que é, inclusive, um valor mais prudente pois evita valores extremos que podem conduzir a erros significativos.

O fato de ter a fórmula sido eficiente, comprova que a P.I. é função da P.E. na superfície de cada abertura.

As P.I. mostram pouca variação espacial, exceto nas regiões próximas das aberturas, e tanto menos quanto menor o número de aberturas. Isto justifica a consideração de apenas um coeficiente aerodinâmico (coeficiente de forma,  $C_d$ ) para todo o

interior da edificação, pelo menos no caso de edificações sem divisões internas e percentagem de aberturas dentro dos limites estudados neste trabalho.

Quando existe uma abertura dominante recebendo incidência direta do vento, a P.I. é extremamente flutuante e tanto mais quanto menores as aberturas em sucção. O fenómeno vai desaparecendo à medida que as áreas em sucção vão se tornando, somadas, aproximadamente a metade da abertura dominante. Isto ocorre tanto para vento turbulento e deslizante, como para vento suave e uniforme. O fato pode ser devido às oscilações de Helmholtz, da acústica, podendo ter sido alcançada a frequência de ressonância correspondente. Isto é apenas uma hipótese a ser investigada em futuros trabalhos. Apenas constatou-se o fenómeno.

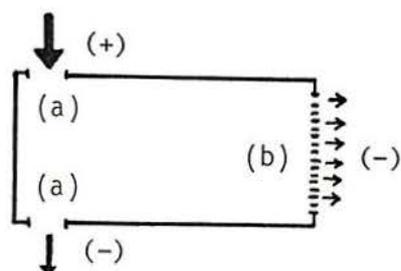
O  $C_i$  é muito mais sensível, e responde rapidamente, a uma variação relativa na área de qualquer abertura a barlavento, tanto sofrendo incidência direta do vento, como nas zonas próximas às quinas, com grandes picos de sucção.

Para aberturas bem imersas na esteira, e localizadas mais para sotavento (e não existindo aberturas com incidência direta do vento),  $C_i$  não demonstra alteração significativa quando há variação relativa destas áreas.

As conclusões semelhantes chegaram Irminger e Nøkkentved<sup>32</sup>.

Definitivamente, o tipo de abertura tem influência na vazão do fluido pela edificação. Isto é muito claro em vários casos. Mesmo aberturas de um mesmo tipo vão modificando o escoamento no interior do corpo, alterando o expoente  $n$ , à medida que vão aumentando ou diminuindo suas áreas e se aproximando de aberturas de tipo diferente. Por exemplo: a menor abertura do tipo (a) já pode se enquadrar no tipo de abertura (c).

Constatou-se que a permeabilidade disseminada tipo (b) causa uma dificuldade para o escoamento do ar, que passa mais rápida e eficientemente por aberturas tipo (a). A explicação para este fato é a seguinte: como há maior perímetro para a mesma área, há maior atrito e maior perda de carga. Isto



é nítido nos casos em que a abertura por onde o ar entra é  $1/2$  da área da permeabilidade disseminada, tendo a outra saída também  $1/2$  da área tipo (b). Mais ainda se a permeabilidade está mais distante e a saída tipo (a) mais perto da abertura de entrada do ar (ver figura ao lado). Quando as áreas das aberturas tipo (a) diminuem, mas mantendo a do tipo (b) (abertura dominante com  $N \geq 2$ ), o escoamento se normaliza e passa a se enquadrar na fórmula convencional.

Quanto ao tipo de vento, o que se tem a dizer é o seguinte: de uma maneira geral os fenômenos ocorrem de maneira semelhante tanto para um como para outro tipo de escoamento incidente. A P.I. mostrou-se sensivelmente dependente da pressão na superfície externa da abertura, e da maneira como o tipo desta abertura afeta o escoamento do ar através da mesma, para qualquer tipo de vento. Além da diferença nos valores dos coeficientes, foi verificado que a fórmula se enquadra melhor ao caso do vento turbulento e deslizante, com uma dispersão maior dos valores de  $n$  para o escoamento suave e uniforme. Parece que a influência do tipo de vento na P.I. é mais indireta, em função dos valores dos coeficientes aerodinâmicos externos.

Com uma pequeníssima permeabilidade disseminada pela edificação já é estabelecida, em seu interior, uma pressão que é função da pressão externa sobre esta permeabilidade. Já quando passa a existir uma abertura dominante com  $N$  considerável, a P.I. passa a ser definida por esta abertura. E ao Engenheiro interessa responder à seguinte pergunta: levar ou não em conta a permeabilidade disseminada que toda a edificação normal apresenta, como frestas de portas, janelas, forros, etc.?

Resposta (ver 4.1 - Estanqueidade do modelo de P.I.):

Sim, se a edificação encontrar-se totalmente fechada, pois a P.I. irá responder segundo esta permeabilidade (a edificação provavelmente se encontrará em sucção interna); ou quando existir alguma abertura normal e a área desta não for consideravelmente maior que a soma das áreas devidas à permeabilidade disseminada.

Não, se houver qualquer abertura que, por suas condições, torne a permeabilidade disseminada desprezável. Os limites dependem de cada caso e da experiência e bom senso do projetista. É importante que fique claro que esta permeabilidade existente pode ter diversos valores, variando para cada caso (como indicado no capítulo 2) e não é qualquer permeabilidade que pode ser desprezada.

Como uma primeira indicação, pode-se desprezar esta permeabilidade disseminada "normal", existente em edificações "normais", se qualquer abertura tiver uma área de, aproximadamente, 10 (dez) vezes a soma da área devida a esta permeabilidade.

Finalmente, tem-se a dizer que é necessário ter muito cuidado com o tipo de fita adesiva a ser utilizada em ensaios que requeiram uma vedação ao ar.

## 6.2 - Recomendações

De tudo que foi exposto, tem-se a recomendar o seguinte:

a) Parece imprescindível que os diversos tipos de abertura existentes em uma edificação real, sejam correta e cuidadosamente reproduzidos em simulações com modelos nos ensaios em túnel de vento, quando medições envolvendo pressões internas tenham importância.

b) Também é recomendada a troca da definição de abertura dominante, dada na NBR-6123 como sendo a abertura cuja área é igual ou superior à área total das aberturas que

constituem a permeabilidade considerada sobre toda a superfície externa da edificação ( $N \geq 1$ ), para a abertura cuja área é igual ou superior ao dobro da área total das outras aberturas ( $N \geq 2$ ). A partir deste valor, regras envolvendo alguns fenômenos são mais corretamente definidas.

### 6.3 - Sugestões para futuras pesquisas

Este trabalho dá início a uma intensificação às pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS sobre pressões internas, tanto para fins estruturais, como para problemas de ventilação natural.

Seria de grande valia a realização de pesquisas mais aprofundadas sobre este tema. Com aplicação prática mais imediata, devem ser investigados os seguintes tópicos:

-- Medição das flutuações da P.I. O estudo detalhado do fenômeno, com equipamento eletrônico de registro e análise conveniente, deve incluir:

- \* determinação de gráficos desta flutuação com o tempo;
- \* valores médios, RMS, de pico e fator de pico;
- \* correlação espacial das flutuações entre diversos pares de pontos e entre P.E. e P.I.;
- \* densidade de distribuição das flutuações;
- \* densidade espectral da variância destas flutuações;
- \* desenvolvimento de uma expressão matemática que inclua o efeito das flutuações da P.I.;
- \* estudo dos efeitos causados por oscilações de Helmholtz em edificações;
- \* estudo dos efeitos devidos a variações no volume interno da edificação e na velocidade do escoamento interno.

-- Ensaio em modelos de edificações com divisões internas são, também, muito importantes, tanto para pressões médias como para flutuantes. É necessário verificar se a fórmula usual é passível de utilização através da resolução, neste caso, de um sistema de equações.

-- O estudo mais detalhado do comportamento de uma quantidade maior de tipos de aberturas, com bem menos combinações entre eles, se faz necessário com vistas ao estabelecimento de valores do coeficiente de vazão,  $K$  (que faz o papel de um coeficiente de correção de  $n$ ). A verificação da necessidade da simulação de  $Re$  para aberturas também é essencial.

-- Paralelamente, o desenvolvimento de modelos matemáticos associados com simulações computacionais, também é um tema que exige maior aprofundamento, sempre guiados, evidentemente, por resultados experimentais.

-- Para finalizar, é extremamente necessário que sejam feitas freqüentemente medições em edificações reais de uma maneira cada vez mais completa. Somente estas medições podem validar as técnicas de simulação, tanto em túnel de vento, como através de computadores.

## BIBLIOGRAFIA

1. AMANO, T., FUJII, K., TAZAKI, S. Wind loads on permeable roof blocks in roof insulation systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 7, 1987, Aachen. Preprints... Aachen: Fotodruck J. Mainz, 1987. v.3, p.91-100.
2. ARNSTEIN, K., KLEMPERER, W. Wind pressures on the Akron airship dock. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v.3, n.3, jan. 1936. p.88-90.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Forças devidas ao vento em edificações: NBR6123. Rio de Janeiro, 1988. 110p.
4. AYNSLEY, R.M. Wind-generated natural ventilation of housing for thermal comfort in hot humid climates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 5, 1979, Fort Collins, Colo. Proceedings... Oxford: Pergamon Press, 1979 v.1, p.243-254.
5. AYNSLEY, R.M., LAE, P.N.G. Natural ventilation model studies. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIND TUNNEL MODELING CRITERIA AND TECHNIQUES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS, 1982, Gaithersburg, Maryland. Proceedings. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. p.465-485.
6. BLESSMANN, J. *Aerodinâmica das construções* 2.ed. Porto Alegre: Sagra, 1990. 263p.
7. \_\_\_\_\_. *Ação do vento em telhados*. Porto Alegre: SAGRA, 1991. 215p.
8. \_\_\_\_\_. *Acidentes causados pelo vento*. 3.ed. rev. ampl. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1986. 81p. (Série engenharia estrutural, 2).
9. \_\_\_\_\_. Efeitos do vento na cobertura de um ginásio com lanternim. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 22. Santiago, Chile, 1983. *Anais*, 1983, v.1, A-7. 15p.

10. \_\_\_\_\_. Influência das características do vento simulado sobre as pressões em coberturas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25. Porto Alegre, Brasil, 1991. *Anais*, 1991, v.5, V-13. 12p.
11. \_\_\_\_\_. Estudo Aerodinâmico da Cúpula do Hotel Tropical de Manaus. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 14; e SIMPÓSIO PAN-AMERICANO DE ESTRUTURAS, 4, Buenos Aires, out. 1970. *Anais*, Buenos Aires, CEI, 1971.
12. \_\_\_\_\_. *Pressão interna*. 3.ed. rev. ampl. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1991. 78p. (Série Engenharia Estrutural, 5).
13. \_\_\_\_\_. The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.10, p.231-248, 1982.
14. BUILDING RESEARCH STATION *Wind loading on buildings-3*. Garston, 1969. p.1-8. (Digest, 105).
15. CHEUNG, J.C.K., MELBOURNE, W.H. Wind loading on a porous roof. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 7, 1987, Aachen. *Preprints...* Aachen: Fotodruck J. Mainz, 1987. v.3, p.71-80.
16. COOK, N.J. *The designer's guide to wind loading of building structures*. Garston: Department of the Environment of the Building Research Establishment, 1985. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification.
17. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_, 1990. Part 2: Static structures.
18. CUNHA, R.D. da, CLÁUDIO, M. A stable algorithm for the calculus of the internal pressure coefficients on wind tunnels. *Advances in Engineering Software*, v.10, n.4, p.215-218, Oct. 1988.
19. DALGLIESH, W.A. Air infiltration and internal pressures in tall buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TALL BUILDINGS, 3, 1987. *Proceedings...*, 1987. Chicago. p.15-26.
20. \_\_\_\_\_. Specifying wind pressure for cladding design. In: CANADIAN WORKSHOP ON WIND ENGINEERING, 3, 1981, Vancouver. *Design against wind: The 1980 National Building Code of Canada*.

21. DAVENPORT, A.G. On the assesment of the reliability of wind loading on low buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.11, p.21-37, 1983.
22. \_\_\_\_\_. The relationship of reliability to wind loadings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.13, p.3-27, 1983.
23. \_\_\_\_\_. Wind tunnel testing and cladding pressures. Presented at the Fall Symposium on High Rise Buildings "Exterior Cladding on High Rise Buildings", Chicago, Nov.1989. 23p.
24. DAVENPORT, A.G., SURRY, D., STATHOPOULOS, T. Wind loads on low rise buildings: final report of phase III. Part 1 - text and figures. London, Ontario, Canada: The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Faculty of Engineering Science, The University of Western Ontario, 1978. 51p.
25. D'HAVÉ, R.L., L'Action du vent sur les bâtiments. Bruxelles, A.B.E.M., 1965. 11p. (Publication, 321).
26. \_\_\_\_\_. Action du vent sur les bâtiments; raport des recherches faites par le Bureau SECO avec l'appui de IRSIA. Bruxelles, Bureau de Contrôle pour la Sécurité de la Construction en Belgique, 1963. 2v.
27. FLACHSBARTH, O. Winddruck auf Gasbehälter. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. IV Lieferung, 1932. p.134-8.
28. HADDON, J.D. Wind loading on roofs. *Engineering*, London, 184(4782): 559-61, Nov. 1957.
29. HARRIS, R.I. The propagation of internal pressures on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.34, p.169-184, 1990.
30. HOLDØ, A.E., HOUGHTON, E.L., BHINDER, F.S. Effects of permeability on wind loads on pitched-roof buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.12, p.255-279, 1983.
31. HOLMES, J.D. Mean and fluctuating internal pressures induced by wind. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 5, 1979, Fort Collins, Colo. *Proceedings...* Oxford: Pergamon Press, 1979. v.1, p.435-450.

32. IRMINGER, J.O., NØKKENTVED, C. **Wind-pressure on buildings**. Experimental Researches, First Series. Copenhagen, 1930.
33. \_\_\_\_\_. **Wind-pressure on buildings**. Experimental Researches, Second Series. Copenhagen, Naturvidenskabelige Samfund, 1936.
34. JANEIRO BORGES, A.R., DIAS DELGADO, J., GIL SARAIVA, J.A. Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate and communicating low-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.11, p.239-245, 1983.
35. JANEIRO BORGES, A.R., GIL SARAIVA, J.A. Ventilation rates of two communicating low rise buildings as affected by terrain roughness. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 6, 1983, Gold Coast, Australia. **Paper preprints...[S.l.:s.n.]**, 1983. v.3, session 17, 8p.
36. KANDOLA, B.S. Wind effects on buildings with varying leakage characteristics - Wind-tunnel investigation. **Journal of Industrial Aerodynamics**, v.3, p.267-284, 1978.
37. KIEL, D.E., WILSON, D.J., SHERMAN, M.H. Air leakage flow correlations for varying house constructions types. In: ASHRAE ANNUAL MEETING, 1985, Honolulu, Hawaii. **Infiltration and air leakage**. Atlanta, Ga.: ASHRAE, 1985. p.38-53.
38. KRAMER, C., GERHARDT, H.J. Wind loads on permeable roofing systems. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.13, p.347-358, 1983.
39. LEE, Y., LIANG, T.H., TANAKA, H. Non-linearity of pressure differentials induced by wind and mechanical ventilation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 6, 1983, Golden Coast, Australia. **Paper preprints... [S.l.:s.n.]**, 1983. v.3, session 17, 12p.
40. LIU, H. Wind pressure inside buildings. In: US NATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING RESEARCH, 2, 1975, Colorado.
41. LIU, H., RHEE, K.H. Helmholtz oscillation in building models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v.24, p.95-115, 1986.

42. LIU, H., SAATHOFF, P.J. Internal pressure and building safety. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v.108, n.10, p.2223-2234, Oct. 1982.
43. MATTINGLY, G.E., PETERS, E.F. Wind and trees: air infiltration effects on energy in housing. *Journal of Industrial Aerodynamics*, v.2, p.1-19, 1977.
44. MEHTA, K.C. Wind induced damage observations and their implications for design practice. *Engineering Structures*, v.6, p.242-247, Oct. 1984.
45. 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.*
46. NEWBERRY, C.W., EATON, K.J. *Wind loading handbook*. Garston: Building Research Establishment, 1974. cap.10, p.47-55.
47. NEWBERRY, C.W., EATON, K.J., MAYNE, J.R. Wind loading on tall buildings - further results from Roxey House. *Industrial Aerodynamics Abstracts*, 4. 16p. 1973.
48. PRIS, M.R. *L'Action du vent sur les bâtiments et constructions*. Partie I.
49. ROBERTSON, A.P., HOXEY, R.P., MORAN, P. A full-scale study of wind loads on agricultural ridged canopy roof structures and proposals for design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.21, n.2, p.167-205, 1985.
50. SAATHOFF, P.J., LIU, H. Internal pressure of multi-room buildings. *Journal of Wind Engineering Mechanics, ASCE*, v.109, n.3, p.908-919, June 1983.
51. SEIFERTH. *Winddruckmessungen an einem Gasbehälter*. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen. III Lieferung, 1935. p.144-6.
52. SEXTON, D.E. *Buildings aerodynamics*. Garston, Building Research Station, 1968. 6p. (Current Paper 64/68).
53. SHAW, C.Y. Air tightness: supermarkets and shopping malls. *ASHRAE Journal*, v.23, n.3, p.44-46, Mar. 1981.

54. STATHOPOULOS, T. Wind loads on low rise buildings: a review of the state of the art. *Engineering Structures*, v.6, n.2, p.119-135, Apr. 1984.
55. STATHOPOULOS, T., KOZUTSKY, R. Wind-induced internal pressures in buildings. *Journal of Structural Engineering*, v.112, n.9, p.2012-2026, Sept. 1986.
56. STATHOPOULOS, T., SURRY, D. Scale effects in wind tunnel testing of low buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.13, p.313-326, 1983.
57. STATHOPOULOS, T., SURRY, D., DAVENPORT, A.G. Internal pressure characteristics of low-rise buildings due to wind action. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 5, 1979, Fort Collins, Colo. *Proceedings*... Oxford: Pergamon Press, 1980. p.451-463.
58. SURRY, D., DAVENPORT, A.G., STATHOPOULOS, T. The revised wind loads for low-rise buildings. In: CANADIAN WORKSHOP ON WIND ENGINEERING, 3, 1981, Toronto.
59. \_\_\_\_\_. Wind loads on low rise buildings. In: ASCE FALL CONVENTION, 1979, Atlanta, Georgia. *Proceedings*... London, Ontario, Canada: The University of Western Ontario, Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Faculty of Engineering Science, 1979. 26p.
60. TANAKA, H., LEE, Y. Stack effect and building internal pressure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 7, 1987, Aachen. *Preprints*... Aachen: Fotodruck J. Mainz, 1987. v.4, p.149-158.
61. VICKERY, B.J., DAVENPORT, A.G., SURRY, D. Internal pressure in low-rise buildings. In: CANADIAN WORKSHOP ON WIND ENGINEERING, 4, 1984, Toronto. p.43-64.
62. VICKERY, B.J., KARAKATSANIS, C. Discharge coefficients and internal pressures in well ventilated buildings. Presented at the 2nd Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering, Beijing, China, June 1989. 11p.
63. 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, Department of Scientific and Industrial Research, 1963. 18p.

64. WILSON, J.A. Windstorms and their effects on buidings.  
Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Boston,  
38(1):262-71, Jan. 1961.