



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MARINÊS SILVANI

**SUBSÍDIOS PARA O PROJETO DA VENTILAÇÃO NATURAL
EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Passo Fundo

2005

MARINÊS SILVANI

**SUBSÍDIOS PARA O PROJETO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Dissertação de Mestrado

Marinês Silvani

Orientador: Prof. Dr. Mario José Paluch

**SUBSÍDIOS PARA O PROJETO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia e Arquitetura da
Universidade de Passo Fundo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Passo Fundo

2005

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação:

Subsídios para o projeto da ventilação natural em pavilhões industriais

Elaborada por:

Marinês Silvani

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia

Aprovado em: 30/04/2005
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Mario José Paluch
Presidente da Comissão Examinadora

Prof. Dr. Antonio Thome
Coord. Prog. Pós-Graduação em Engenharia

Prof. Ph.D. Acir Mércio Loredo Souza
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Prof. Dr. Henrique da Silva Pizzo
UPF – Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Moacir Kripka
UPF – Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Luís Édson Saraiva
UPF – Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2005

Ao meu noivo, Idalgo Novello;
aos meus pais e demais familiares;
aos meus colegas de trabalho;
aos meus amigos.

Agradeço pela dedicação, e empenho demonstrado na elaboração desta dissertação:

- Ao meu orientador Professor Mario José Paluch que incentivou, coordenou e acompanhou toda a realização deste trabalho com grande presteza e eficiência;

- Ao Professor Acir Mércio Loredou Souza que, disponibilizou os recursos para realização dos ensaios em túnel de vento no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

- Aos funcionários do Laboratório de Aerodinâmica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Paulo Bueno e Elvis Carpeggiani, pela dedicação cuidadosa na confecção do modelo e execução dos ensaios;

- Aos professores e funcionários do Curso de Pós Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, pelo conhecimento transmitido e pelas vezes que de diferentes maneiras contribuíram para a efetivação do presente trabalho;

- Ao meu noivo Idalgo Novello, aos meus pais e demais familiares, pela incansável atenção e compreensão dispensada nos momentos difíceis, durante a realização desta dissertação;

- À Universidade de Passo Fundo – UPF, pelo apoio financeiro;

- Aos colegas de trabalho da Metal Ross Indústria Metalúrgica Ltda e Medabil Varco Pruden SA, em especial ao Diretor de Tecnologia de Novos Produtos Aldir Henrique Zucchetti e Gerente Industrial Eloy Rossoni, pelo incentivo e reconhecimento dispensado para que este trabalho se concretizasse;

- Aos inesquecíveis colegas e amigos, pela convivência, pelo apoio e pelos momentos vividos no Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo.

A eficiência e o rendimento demonstrado pelo ser humano trabalhador para atividades em ambientes industriais confortáveis, refletem a eficiência aplicada pelos projetistas nas soluções determinadas ao projeto de sistemas de ventilação natural de galpões industriais. Qualquer critério sem fundamentação teórica e experimental adotado na definição de um sistema de ventilação natural repercute em quaisquer resultados de conforto e sensação térmica. (MARINÊS SILVANI)

RESUMO

A ventilação natural deve ser a primeira alternativa a ser estudada no projeto de ambientes industriais, o que se deve a uma série de fatores relacionados aos custos e exigências de mercado. Os métodos de cálculo do sistema de ventilação natural de uma edificação consideram duas situações meteorológicas: existência ou não de vento. Na primeira situação, a ventilação é promovida pelo efeito do vento e pelo denominado efeito chaminé. Na segunda situação, ou seja, quando não há vento, a ventilação é provocada unicamente pelo efeito da convecção natural, ou seja, o efeito chaminé. Na bibliografia técnica nacional e internacional são apresentadas diferentes equações para efetuar o dimensionamento do sistema de ventilação natural em pavilhões industriais. A aplicação destes modelos, segundo Frota (1989) conduz a resultados variados. Porém, os resultados apresentados neste trabalho indicam que os modelos teóricos considerados apresentam uma dispersão de resultados compatíveis com o bom exercício da engenharia. Considerando duas situações particulares: edificação com duas aberturas de áreas iguais, e edificação com áreas distintas, porém com igual coeficiente de descarga, foi possível propor equações para o cálculo da vazão de ar considerando o efeito do vento, efeito chaminé ou ambos simultaneamente, bem como equações que determinam a área necessária das aberturas de entrada e saída de ar. Por outro lado, o emprego de certos modelos teóricos, para a determinação da vazão de ventilação por efeito dos ventos, requer o conhecimento da distribuição dos coeficientes de pressão nas zonas onde serão localizadas as aberturas. Neste trabalho são apresentados resultados obtidos em ensaios em túnel de vento que permitem afirmar que para geometrias de pavilhões industriais não muito diferentes da analisada neste trabalho, os coeficientes de forma (médias espaciais dos coeficientes de pressão sobre grandes superfícies) sugeridos pela norma NBR-6123 (1988) podem ser empregados no projeto de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais.

Palavras-chave: ventilação natural, pavilhões industriais, ensaios em túnel de vento, modelos teóricos aproximados.

ABSTRACT

The natural ventilation must be the first alternative to be studied for industrial environment design, and this fact is due to several reasons related to costs and market requirements. The design methods for natural ventilation system of a building take into consideration meteorological situations: the existence or the non-existence of wind. In the first situation, the ventilation is promoted by the wind effect and by the so-called stack effect. In the second situation, that is, when there is no wind, the ventilation only exists by the effect of natural convection, that is, the stack effect. In the Brazilian, as well as in the international technical publications, different equations are presented to perform the natural ventilation calculation for industrial buildings. According to Frota (1989), the use of those models leads to several results. However, the results showed in this paper indicate that the considered theoretical models show results that are compatible with the good exercise of the Engineering. Considering two specific situations, a building with two openings with alike areas, or not, but with the same outlet coefficient, it was possible to propose equations for the calculation of the air outlet, taking into consideration the wind effect, the stack effect, or both simultaneously, as well, as equations that determinate the necessary area at the air inlet and outlet of the openings. On the other hand, the use of some theoretical models, to determine the ventilation outlet by the wind effect, requires to knowledge the distribution of the pressure coefficients in the areas where the openings will be located. This paper presents the results obtained from wind tunnel testing, which make it possible to state that for shapes of industrial buildings not too different from the one analyzed in this work, the shape coefficients (space mean of pressure coefficient on large surfaces), suggested by the Brazilian building code NBR 6123 (1988) can be used in the design of natural ventilation systems in industrials buildings.

Keywords: natural ventilation, industrial buildings, wind tunnel tests, approximated theoretical models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ventilação local e ventilação geral.....	16
Figura 2: Passagem do ar através de duas aberturas verticais.....	25
Figura 3: Efeito chaminé - Aberturas para entrada e saída de ar.	26
Figura 4: Ventilação por ação dos ventos.....	26
Figura 5: Diferença de pressão nas paredes verticais para $t_i > t_e$	31
Figura 6: Edificação com duas aberturas separadas verticalmente por uma distância h	33
Figura 7: Gráfico de incremento de vazão de ar causado pelo fato das aberturas não serem iguais.	37
Figura 8: Edificação com duas aberturas, uma a barlavento e a outra a sotavento.	39
Figura 9: Gráfico para a determinação da vazão total (efeito chaminé + ação dos ventos).....	41
Figura 10: Curva de variação do coeficiente K_0 segundo a variação da relação A_e / A_s	49
Figura 11: Cotas e parâmetros físicos para o ar.	50
Figura 12: Vista superior do galpão industrial.....	56
Figura 13: Corte Transversal do galpão industrial.	57
Figura 14: Fachada dos oitões do galpão industrial.	58
Figura 15: Fachada das laterais do galpão industrial.....	59
Figura 16: Venezianas industriais para ingresso do ar externo.....	60
Figura 17: Janelas basculantes para entrada do ar externo.	61
Figura 18: Exaustor natural de cumeeira para saída do ar quente.....	61
Figura 19: Definição da altura h	63
Figura 20: Coeficientes de pressão externa das paredes e telhado para vento à 90°	64
Figura 21: Coeficientes de pressão externa das paredes e telhado para vento à 0°	65
Figura 22: Vazões de ar considerando o efeito chaminé e ação do vento a 90° , para diferentes magnitudes do vetor velocidade média do vento.....	70
Figura 23: Vazões de ar considerando o efeito chaminé e ação do vento a 0° , para diferentes magnitudes do vetor velocidade média do vento.....	70
Figura 24: Túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS	77
Figura 25: Circuito aerodinâmico do túnel de vento TV-2.....	78
Figura 26: Características geométricas do pavilhão industrial ensaiado.	79
Figura 27: Modelo do pavilhão em madeira.....	80
Figura 28: Tomadas de pressão no telhado.....	81
Figura 29: Tomadas de pressão da parede lateral.	81
Figura 30: Tomadas de pressão na parede de oitão.....	82
Figura 31: Características do túnel de vento para simulação do vento tipo $p = 0,11$	83
Figura 32: Características do túnel de vento para simulação do vento tipo $p = 0,23$	83
Figura 33: Perfil de velocidades médias horárias em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel para vento com $p = 0,11$ e $p = 0,23$	84
Figura 34: Intensidade (I_1) da componente longitudinal da turbulência.....	84
Figura 35: Macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência.	85
Figura 36: Exemplo de fotografia do multimanômetro de pressões.....	87
Figura 37: Verificação do esquema de ligações.....	88
Figura 38: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,11$	94
Figura 39: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,11$..	95
Figura 40: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,23$	96
Figura 41: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,23$..	97
Figura 42: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,11$	98
Figura 43: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,11$..	99
Figura 44: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,23$	100
Figura 45: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,23$	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posição da zona neutra em função da relação área da abertura de saída e área da abertura de entrada de ar.	36
Tabela 2 – Incremento de vazão de ar para áreas de aberturas desiguais.	37
Tabela 3 – Determinação das vazões totais (efeito chaminé e ação do vento).	41
Tabela 4 – Área necessária das aberturas de entrada ou saída de ar considerando o efeito chaminé....	66
Tabela 5 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé (Q_{ch}).	67
Tabela 6 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento a 90° (Q_v).	68
Tabela 7 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento a 0° (Q_v).	68
Tabela 8 – Vazões de entrada e saída de ar de nas aberturas do pavilhão, para vento a 90° (Q_v).	68
Tabela 9 – Vazões de entrada e saída de ar de nas aberturas do pavilhão, para vento a 0° (Q_v).	69
Tabela 10 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento a 90°	69
Tabela 11 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento a 0° ...	69
Tabela 12 – Vazões considerando o efeito chaminé e ação do vento a 90° , nas diferentes aberturas, para magnitudes do vento variável.	71
Tabela 13 – Vazões considerando o efeito chaminé e ação do vento a 0° , nas diferentes aberturas, para magnitudes do vento variável.	72
Tabela 14 – Características do protótipo e do modelo do pavilhão.	78
Tabela 15 – Valores da intensidade (I_1) e da macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência correspondente ao topo do modelo (lanternin).	85
Tabela 16 - Coeficientes $k_{(zref)}$ do túnel de vento	90
Tabela 17 – Velocidades de referência (V_{ref}) e número de Reynolds (Re) durante os ensaios.	90
Tabela 18 – Vazões de entrada ou saída de ar considerando o efeito do vento (Q_v), com $p = 0,11$ e $p = 0,23$	102
Tabela 19 – Vazões de entrada ou saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento, para vento com $p = 0,11$ e $0,23$	103
Tabela 20 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 0° , com $p = 0,11$ e $p = 0,23$	103
Tabela 21 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 90° , com $p = 0,11$ e $p = 0,23$	104
Tabela 22 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 45° , com $p = 0,11$ e $p = 0,23$	104
Tabela 23 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 0° para $p = 0,11$ e $p = 0,23$	105
Tabela 24 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 90° para $p = 0,11$ e $p = 0,23$	105
Tabela 25 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 45° para $p = 0,11$ e $p = 0,23$	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Considerações iniciais.....	12
1.2 Problemas de pesquisa.....	12
1.3 Justificativas.....	13
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 Objetivo geral.....	13
1.4.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Conceitos fundamentais.....	15
2.2 Ventilação industrial sob o ponto de vista da Legislação do Ministério do Trabalho.....	16
2.3 Contaminantes do ar.....	16
2.4 Conforto térmico.....	18
2.4.1 Índices de conforto térmico.....	19
2.5 Ventilação Geral Diluidora (VGD).....	20
2.6 Ventilação Natural.....	25
3 PROJETO DE VENTILAÇÃO NATURAL APLICANDO MÉTODOS APROXIMADOS.....	28
3.1 Introdução.....	28
3.2 Carga térmica.....	29
3.3 Cálculo da vazão de ar através de aberturas.....	30
3.4 Cálculo da diferença de pressão e vazão de ar por efeito chaminé.....	31
3.5 Cálculo da diferença de pressão e vazão de ar por efeito dos ventos.....	37
3.6 Cálculo da vazão de ar por efeito simultâneo (efeito chaminé e ação do vento):.....	40
3.7 Métodos aproximados.....	41
3.8 Equações propostas neste trabalho.....	53
3.9 Aplicação dos modelos aproximados.....	55
3.10 Análise dos resultados.....	72
4 - ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO.....	75
4.1 Introdução.....	75
4.2 Condições de semelhança.....	76
4.2.1 Semelhança geométrica.....	76
4.2.2 Semelhança cinemática.....	76
4.2.3 Semelhança dinâmica.....	76
4.3 – Características do túnel de vento.....	77
4.4 – Modelo ensaiado.....	78
4.5 – Vento natural simulado.....	82
4.6 – Instrumentos utilizados durante os ensaios.....	85
4.6.1 – Manômetro.....	85
4.6.2 – Termômetro.....	86
4.6.3 – Barômetro.....	86
4.6.4 – Fotografias.....	86
4.7 – Procedimento experimental.....	87
4.7.1 – Descrição dos ensaios.....	87
4.7.2 - Pressão estática de referência (p_{ref}).....	88
4.7.3 – Pressão dinâmica (q_{ref}) e velocidade (V_{ref}) média do vento no ponto de referência.....	89
4.7.4 – Número de Reynolds (Re).....	90
4.7.5 – Correção do bloqueio.....	91
4.8 – Processamento dos dados dos ensaios.....	92
4.9 – Resultados dos ensaios.....	93
4.9.1 – Coeficientes de pressão externa.....	93
4.10 – Aplicação dos modelos aproximados com os resultados dos ensaios.....	102
4.11 – Análise dos resultados.....	106
5 CONCLUSÕES.....	108

	11
5.1 Conclusões da pesquisa.....	108
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXO A - CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA DO GALPÃO INDUSTRIAL.....	113
ANEXO B - COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA DO VENTO DO GALPÃO ENSAIADO NO TÚNEL DE VENTO.....	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A ventilação é de fundamental importância na promoção do equilíbrio térmico do ser humano e na manutenção da qualidade do ar no interior dos edifícios.

Os custos com energia elétrica e a necessidade crescente de reduzir seu consumo fazem da ventilação natural a primeira opção a ser estudada como sistema de conforto térmico no projeto de edificações industriais.

1.2 Problemas de pesquisa

Em geral, os métodos de cálculo do sistema de ventilação natural de uma edificação consideram duas situações meteorológicas: existência ou não de vento. Na primeira situação, a ventilação, ou seja, o ingresso e saída do ar da edificação, é promovida pelo efeito do vento e pelo denominado efeito chaminé. Na segunda situação, ou seja, quando não há vento, a ventilação é provocada unicamente pelo efeito da convecção natural, ou seja, o efeito chaminé, que tem origem na diferença de temperatura do ar externo em relação ao interno da edificação.

Na bibliografia técnica nacional e internacional são apresentadas diferentes equações para efetuar o dimensionamento do sistema de ventilação natural em pavilhões industriais. A aplicação destes modelos, segundo Frota (1989) conduz a resultados variados. Evidentemente, os diferentes resultados se devem às hipóteses adotadas pelos modelos teóricos, ou à inadequação do modelo adotado ou proposto.

Do parágrafo anterior surge o primeiro problema a ser pesquisado: *os modelos teóricos aproximados disponíveis na bibliografia técnica conduzem a resultados muito díspares?*

Por outro lado, o emprego de certos modelos teóricos aproximados, para a determinação da vazão de ventilação por efeito dos ventos, requer o conhecimento da distribuição dos coeficientes de pressão nas zonas onde serão localizadas as aberturas. Na melhor das situações, ou seja, quando não são empregados resultados disponíveis na literatura, obtidos de ensaios em túnel de vento sem simulação das propriedades do vento natural, os projetistas de sistemas de ventilação natural fazem uso das recomendações existentes em normas de vento atualizadas, como por exemplo, a NBR-6123 (1988). Entretanto, os valores sugeridos pelas normas de vento correspondem normalmente a coeficientes de forma, ou seja, a médias espaciais dos coeficientes de pressão calculada sobre grandes superfícies. Mais ainda, os ensaios em túnel de vento que servem de base para estabelecer os coeficientes de norma foram obtidos sem os dispositivos de ventilação, como por exemplo, os exaustores naturais de cumeeira.

Do parágrafo anterior surge o segundo problema pesquisado nesta dissertação: *podem ser empregados os coeficientes de forma sugeridos pela NBR-6123 no projeto da ventilação natural de pavilhões industriais?*

1.3 Justificativas

Este estudo justifica-se pelo fato de que a ventilação natural é, na maioria das vezes, a única alternativa economicamente viável em ambientes industriais.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este estudo, objetiva, de maneira geral, melhorar o estado do conhecimento sobre as metodologias de projeto de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais. E com isto, em um futuro próximo, pretende-se melhorar a confiabilidade das técnicas de projetos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Efetuar uma análise crítica dos modelos aproximados empregados no projeto de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais;
- A partir de ensaios em túnel de vento determinar a aplicabilidade dos coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela NBR-6123 (1988), no projeto dos sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais.

1.5. Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, incluindo este, “Introdução”, onde são identificados o tema, os problemas de pesquisa, os objetivos e as justificativas.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre aspectos básicos associados ao tema da pesquisa: ventilação natural.

O capítulo 3, “Projeto de ventilação natural aplicando métodos aproximados”, apresenta os diferentes métodos aproximados encontrados na bibliografia técnica e a aplicação dos mesmos a um pavilhão industrial.

No capítulo 4, “Ensaio em túnel de vento”, se descrevem os ensaios em túnel de vento, apresentam-se seus resultados e os obtidos com os procedimentos teóricos com coeficientes aerodinâmicos experimentais.

Em “Conclusões”, capítulo 5, apresentam-se as conclusões advindas no estudo e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos fundamentais

Ventilação é o processo natural ou mecânico de fornecimento e remoção de ar de um recinto fechado. Essa troca, quando causada por condições naturais, é denominada ventilação natural e quando é promovida por equipamentos mecânicos, é denominada ventilação mecânica. O objetivo fundamental da ventilação é controlar a pureza do ar e, em determinadas circunstâncias, também pode auxiliar no controle da temperatura e umidade de um ambiente.

A ventilação industrial trata das aplicações da ventilação em ambientes industriais. O uso da ventilação industrial pode ser dividido em três áreas principais (CLEZAR; NOGUEIRA, 1999):

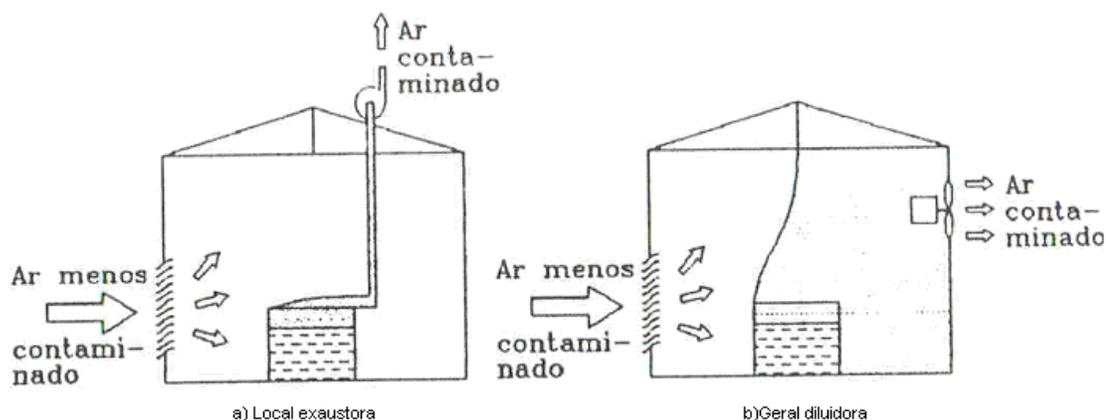
- Controle de contaminantes no ar a níveis aceitáveis;
- Controle da temperatura, velocidade e umidade do ar para conforto;
- Prevenção ao fogo e a explosões.

A ventilação industrial, em acordo com Clezar e Nogueira (1999), pode ser classificada em dois grandes grupos:

- Ventilação local exaustora (VLE), a qual é realizada por meio de um equipamento captador do contaminante no próprio local de sua formação não permitindo que se espalhe pelo recinto. É um tipo de ventilação indicada para situações em que são identificados os tipos e o local das fontes geradoras de poluição.
- Ventilação geral diluidora (VGD), a qual proporciona a ventilação de um ambiente, de um modo global. É um tipo de ventilação normalmente adotado quando é impossível capturar o contaminante antes do mesmo se espalhar pelo

recinto, permitindo dentro de certos limites, o controle da temperatura, da umidade e da velocidade do ar.

A Figura 1 apresenta os dois grupos de ventilação industrial.



Fonte: Clezar e Nogueira, 1999, p.21.

Figura 1: Ventilação local e ventilação geral.

2.2 Ventilação industrial sob o ponto de vista da Legislação do Ministério do Trabalho

Para auxiliar na manutenção de um ambiente confortável para os usuários de edificações industriais, a Legislação do Ministério do Trabalho possui a NR-15 – Norma Regulamentadora de Atividades e Operações Insalubres, a qual apresenta questões ambientais especificamente ligadas às condições de ventilação, sendo:

- Anexo nº 3 – Limites de Tolerância para exposição ao calor;
- Anexo nº 11 – Agentes químicos cuja insalubridade é caracterizada por limite de tolerância;
- Anexo nº 12 – Limites de tolerância para poeiras minerais;
- Anexo nº 13 – Agentes químicos (alguns casos especiais);
- Anexo nº 14 – Agentes biológicos (avaliação qualitativa).

2.3 Contaminantes do ar

A composição volumétrica média do ar puro, em condições normais, é aproximadamente (COSTA, 1982):

- Nitrogênio (N_2) = 78,03%;
- Oxigênio (O_2) = 20,99%;
- Dióxido de Carbono (CO_2) = 0,03%;

- Água (H_2O) = 0,47%;
- Outros gases, além de partículas e microrganismos em suspensão = 0,48%.

Sob o ponto de vista da ventilação natural qualquer outra substância presente no ar, cuja concentração ultrapasse certos limites recomendados ou se sua natureza for nociva ao homem, pode ser chamada de contaminante.

Os contaminates do ar podem ter sua origem em:

- processos de fabricação de materiais diversos como por exemplo serviços de solda, corte, fundição, etc.;
- atividades que envolvem tratamentos superficiais de materiais tais como serviços de limpeza com solventes, pintura, jateamento, polimento, etc.;
- transporte e transferência de materiais particulados através do uso de correias transportadoras, enchimento de recipientes, resfriamento de peças provenientes de processos de alta temperatura, etc..

A seguir é apresentada uma classificação dos contaminantes, baseada no estado físico dos contaminantes dispersos no ar (CLEZAR; NOGUEIRA, 1999):

- gases: são substâncias consideradas contaminantes do ar atmosférico no estado gasoso, em uma condição termodinâmica afastada do ponto de condensação (CO , CO_2 , SO_2 , etc.);
- vapores: são substâncias consideradas contaminantes do ar atmosférico no estado gasoso, em uma condição térmica próxima do ponto de condensação (solventes diversos);
- particulados: são sistemas dispersos, cujas fases dispersas consistem de partículas sólidas ou líquidas. Quando as partículas possuem diâmetros menores do que $100\mu m$, projetadas no ar por ação dos ventos ou processos industriais, os particulados recebem a designação especial de aerossol. Para se distinguir, os diversos tipos de aerossóis, são utilizados termos, conforme segue:
 - a) Fumos: são partículas sólidas, com diâmetros inferiores a $10\mu m$, resultantes da oxidação de vapores de metais que surgem nos processos de fusão, solda e corte de metais;
 - b) Poeiras: são partículas sólidas resultantes da desintegração mecânica de substâncias, com diâmetros compreendidos entre 1 e $100\mu m$;

- c) Fumaças: são partículas sólidas finíssimas resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos;
- d) Névoas: são partículas líquidas de menor tamanho resultante da condensação de vapores ou da dispersão mecânica de líquidos;
- e) Organismos vivos: os mais comuns são o pólen dos vegetais (5 a 150 μ m), os poros de fungos (1 a 10 μ m) e as bactérias (0,2 a 5 μ m).

2.4 Conforto térmico

Conforto térmico é um estado da mente que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o ser humano.

As principais variáveis do conforto térmico são temperatura, umidade, velocidade do ar e atividade desenvolvida pela pessoa e o tipo de vestimenta utilizada pela mesma.

Em acordo com Frota e Schiffer (2001), o organismo humano pode ser comparado a uma máquina térmica que produz calor segundo sua atividade. O homem precisa liberar calor em quantidade suficiente para que sua temperatura interna se mantenha da ordem de 37°C (homeotermia). O processo de produção de energia a partir dos alimentos ingeridos é denominado de metabolismo. Cerca de 20% dessa energia pode ser empregada em produzir “trabalho”. A parcela restante, cerca de 80%, se transforma em calor, que deve ser eliminado para que o organismo seja mantido a 37°C. Tanto o calor produzido como o dissipado, dependem da atividade que o indivíduo desenvolve. Em repouso absoluto (metabolismo basal) a taxa de calor eliminado pelo corpo é de 75W, aproximadamente.

A manutenção da temperatura interna do organismo humano se faz por intermédio de seu aparelho termorregulador. O ser humano experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade. Nessas condições a capacidade de trabalho do indivíduo são máximas.

Se as condições térmicas ambientais causam sensação de frio ou de calor, é porque o organismo está perdendo mais calor ou menos calor, respectivamente, que o necessário para a manutenção da sua temperatura em 37°C.

No caso de sensação de frio, os mecanismos termorreguladores são ativados com o objetivo de reduzir as perdas de calor e aumentar as combustões internas. A redução de trocas térmicas entre os indivíduos e o ambiente se faz através do aumento da resistência térmica da

pele por meio da vasoconstrução, do arrepio, do trizar. O aumento das combustões internas se dá através do sistema glandular endócrino.

No caso da sensação de calor, os mecanismos termorreguladores são ativados com o objetivo de aumentar as perdas de calor e diminuir as combustões internas. O incremento das perdas de calor ocorre por meio da vasodilatação e da exsudação. A redução das combustões internas se faz através do sistema glandular endócrino (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O calor gerado pelo organismo é eliminado através das trocas secas (condução, convecção e radiação) e das trocas úmidas (evaporação).

2.4.1 Índices de conforto térmico

As condições de conforto térmico são função da atividade desenvolvida pelo indivíduo, da sua vestimenta e das variáveis ambientais (temperatura, umidade e velocidade do ar). Além disso, devem ser consideradas outras variáveis como sexo, idade, biótipo, hábitos alimentares etc. Os índices de conforto térmico tentam englobar, num parâmetro, o efeito conjunto dessas variáveis. Em geral, esses índices são determinados fixando um tipo de atividade e a vestimenta utilizada pelo indivíduo para, a partir daí, relacionar as variáveis ambientais, e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais (condição de conforto térmico ou não) por parte dos indivíduos testados.

A ASHRAE (apud FROTA; SCHIFFER, 2001) considera, para os climas mais quentes da América do Norte, 25°C como temperatura ótima, podendo variar entre 23 e 27°C, sendo esses valores aplicáveis para:

- Velocidade do ar 0,5 m/s;
- Umidade relativa entre 30 e 70%;
- Inverno;
- Vestimenta normal;
- Pessoa sentada;
- Ocupação sedentária;
- Temperatura radiante média igual à temperatura do ar.

Recomenda-se ainda:

- Aumentar 2°C para velocidade do ar 0,25 m/s;
- Deduzir 1°C para umidade 90%;
- No verão, acrescentar 1°C;

- Para banheiro (ou similar) acrescentar 3 a 5° C;
- Deduzir até 5° C para ocupação ativa;
- Deduzir 3 a 5° C para áreas de trânsito.

Existem cerca de três dezenas de índices de conforto térmico, porém, para fins de aplicação às condições ambientais correntes nos edifícios habitacionais, escolas, escritório, etc., e para condições brasileiras, Frota e Schiffer (2001) sugerem o emprego dos seguintes:

- Carta Bioclimática, de Olgyay;
- Temperatura efetiva, de Yaglou e Houghthen: ou temperatura efetiva corrigida de Vernon e Warner;
- Índice de conforto equatorial ou índice de Cingapura, de Webb.

2.5 Ventilação Geral Diluidora (VGD)

A ventilação geral diluidora atua de maneira a minimizar a concentração do contaminante do ar por meio de sua diluição. Neste processo, o ar do ambiente de trabalho é substituído por ar externo, de uma maneira global e contínua.

A movimentação do ar seja por infiltração (movimento do ar não controlado, através de aberturas e frestas existentes), ou seja, por ventilação (deslocamento intencional do ar através de aberturas específicas, e dispositivos para ventilação), poderá ocorrer:

- Por diferença de pressão provocada pela ação do vento ou por diferença de temperatura entre o ar externo e interno. Neste caso a ventilação é denominada ventilação natural.
- Por diferença de pressão criada pela ação de um ventilador (insuflando ou succionando). Neste caso a ventilação é denominada ventilação forçada ou mecânica.

A ventilação geral diluidora permite dentro de certos limites controlar a temperatura, a umidade e a velocidade do ar. O controle rigoroso da temperatura e a umidade ambiente só se realizam de um modo praticamente perfeito em instalações de ar condicionado.

A ventilação geral diluidora pode ser utilizada para:

- Remoção de calor sensível: necessária para ventilar ambientes onde são produzidas grandes quantidades de calor tais como salas de transformadores, salas de caldeiras e outros ambientes, com grande desprendimento de calor.
- Remoção de umidade: os desprendimentos de vapor d'água no ar que ocorrem, em determinados ambientes industriais decorrentes de vazamentos ou por

especificidades do processo em si, podem resultar em níveis intoleráveis de umidade de ar.

- Aplicações gerais: para locais onde exista aglomeração de pessoas, tais como cinemas, teatros, ginásios de esportes etc., bem como para locais com geração de contaminantes que oferecem pouco risco para a saúde dos ocupantes.

O principal parâmetro de um projeto de ventilação industrial é a vazão de ar, ou seja, a vazão volumétrica de ar necessária para o ambiente. Ela determina, praticamente, todas as dimensões da instalação de ventilação. O cálculo da vazão de ar externo necessária, Q_e , é feito segundo a finalidade da ventilação:

- Para remoção do calor sensível:

$$Q_e = \frac{q_T}{\rho_e \cdot C_p \cdot \Delta t} \quad (2.1)$$

onde:

Q_e = Vazão de ar, (m³/h);

$q_T = q_i + q_e$ = carga térmica total, (kcal/h);

q_i = taxa de geração interna de calor devido à pessoas, motores, equipamentos, iluminação, etc., (kcal/h);

q_e = taxa de transferência de calor com o exterior, ganho (+), perda (-), (kcal/h);

ρ_e = massa específica do ar externo, (kg/m³);

C_p = calor específico do ar = 0,24 kcal/kg°C;

Δt = aumento de temperatura do ar, (°C).

- Para remoção de umidade:

$$Q_e = \frac{G_v}{W_e \cdot \Delta W} \quad (2.2)$$

onde:

Q_e = vazão de ar, (m³/h);

G_v = geração de vapor, (kg/s);

W_e = umidade absoluta do ar externo, (kg_{H2O}/kg_{ar seco});

ΔW = aumento de umidade absoluta do ar, (kg_{vapor} / kg_{ar seco}).

- Para aplicações gerais, a vazão do ar externo necessária, Q_e , pode ser calculada por um dos dois critérios abaixo:

a) Com base no *número de trocas de ar por hora* (Quadro 2). A vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = N \cdot V \quad (2.3)$$

onde:

Q_e = vazão de ar, (m³/h);

N = índice de renovação de ar por hora, ou, taxa de renovação de ar por hora, ou número de trocas de ar por hora;

\forall = volume do ambiente, (m³);

b) Com base na necessidade, *requerimento ou razão de ar por pessoa* (Quadro 1), para remover odores e fumaça, a vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = Q_p \cdot N_p \quad (2.4)$$

onde;

Q_e = vazão de ar, (m³/h);

Q_p = necessidade, requerimento ou razão (taxa) de ar por pessoa, (m³/h/pessoa);

N_p = número de pessoas.

LOCAL	Q _p (m ³ /h/pessoa)		CONCENTRAÇÃO DE FUMANTES
	RECOMENDÁVEL	MÍNIMO	
Bancos	17	13	Ocasional
Barbearias	25	17	Considerável
Salões de baile	17	13	Ocasional
Bares	68	42	-
Cassinos – grill – room	45	35	-
Escritórios públicos	25	17	Alguns
Escritórios privados	42	25	Nenhum
Escritórios privados	51	42	Considerável
Estúdios	35	25	Nenhum
Lojas	17	13	Ocasional
Salas de hotéis	51	42	Grande
Residências	35	17	Alguns
Restaurantes	25	20	Considerável
Salas de diretores	85	50	Muito grande
Teatros – cinemas	13	8	Nenhum
Teatros – cinemas	25	17	Alguns
Auditórios	13	8	Nenhum
Auditórios	25	17	Alguns
Salas de aulas	50	40	Nenhum
Salas de reuniões	85	50	Muito grande
Por pessoa (não fumando)	13	8	-
Por pessoa (fumando)	68	42	-

Fonte: Adaptado de NB-10 (apud CLEZAR; NOGUEIRA, 1999, p.87).

Quadro 1 – Ração de ar por pessoa.

SITUAÇÃO	TROCAS DE AR POR HORA - N
Auditórios e salas de reuniões	4-6
Padarias	20-30
Bancos	2-4
Salões de banquete	6-10
Salão de bilhar	6-8
Casas de caldeiras	20-30
Lanchonetes	10-12
Cantinas	4-6
Igrejas	0,5-1
Cinemas e teatros	10-15
Salões de clubes	8-10
Salões de dança	6-8
Salões de tingimento de tecidos	20-30
Salas de máquinas	20-30
Oficinas	6-10
Fundições	20-30
Salas de fornos	30-60
Garagens	6-8
Hospitais, geral	4-6
Cozinhas	10-20
Laboratórios	4-6
Lavatórios	10-15
Lavanderias	20-30
Escritórios	4-6
Salões de pintura	30-60
Câmara escura (fotografia)	10-15
Casa de carnes	6-10
Restaurantes	6-10
Sala de aula	2-3
Residências	1-2
Piscinas internas	20-30
Cabines de passageiros (navios)	10-20
Compartimentos de alimentos (navios)	10-30

Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira, 1999, p.88.

Quadro 2 – Trocas de ar por hora, (N).

2.6 Ventilação Natural

A ventilação natural consiste na movimentação (passagem) de ar através de ambiente sem que haja fornecimento de energia ao escoamento por fontes mecânicas.

A ventilação natural consiste na passagem do ar através dos edifícios, entrando por determinadas aberturas e saindo por outras. O fluxo do ar que entra ou sai de um edifício por ventilação natural depende da diferença de pressão entre as partes interna e externa e da resistência oferecida ao fluxo pelas aberturas. A movimentação do ar pode ser gerada através do denominado efeito chaminé (convecção natural) e pelo efeito dos ventos, podendo também ocorrer os dois mecanismos simultaneamente.

Em tempo calmo sem vento, é o efeito chaminé o único responsável pela renovação do ar dos edifícios não dotados de sistemas mecânicos de ventilação. Esse efeito tem sua origem na diferença de temperatura e, por conseguinte, de densidade, entre o ar externo e o ar interno do edifício. A diferença de densidade produz gradientes de pressão com diferentes declividades na parte externa e interna da edificação, conforme mostra a Figura 2.

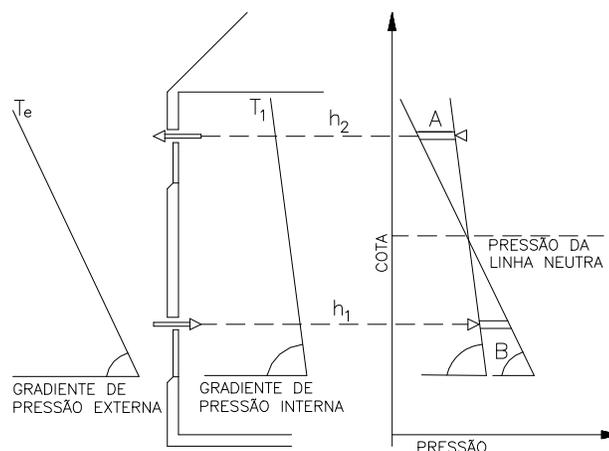


Figura 2: Passagem do ar através de duas aberturas verticais.

Quando a temperatura interna é maior que a externa, o ar externo, mais frio, ingressa na edificação através das aberturas mais baixas e o ar interno mais quente sai pelas aberturas mais elevadas (Figura 3). Um fluxo inverso ocorre quando a temperatura interna do ar é mais baixa que a temperatura externa. A denominada zona neutra, (Figura 2), é uma superfície onde as pressões internas se igualam às externas e, por conseguinte, onde a presença de uma abertura não produz nem entrada ou saída de ar. A ventilação natural por efeito chaminé nada mais é que o processo da convecção natural ou efeito de tiragem natural. Para qualquer

pequeno diferencial de temperatura que provoca um diferencial de pressão, o efeito chaminé se torna perceptível.

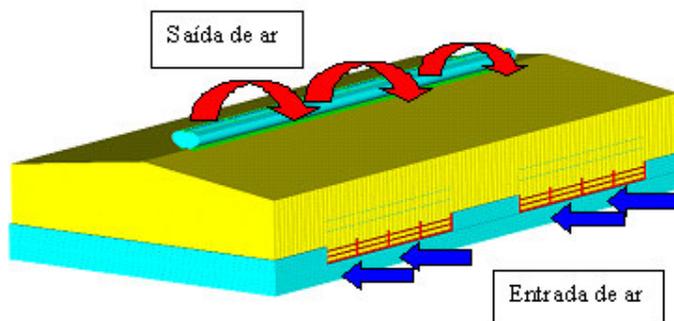
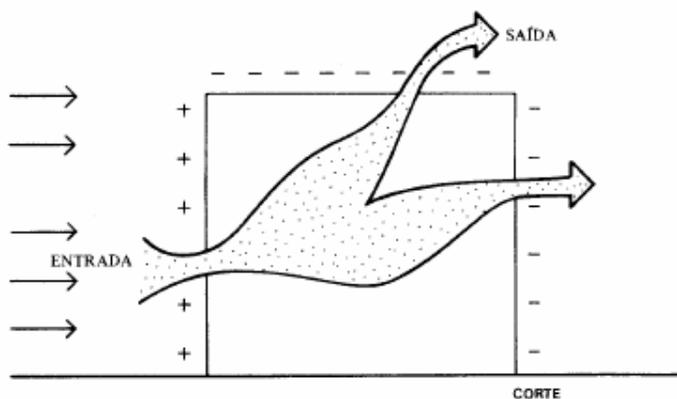


Figura 3: Efeito chaminé - Aberturas para entrada e saída de ar.

A ação do vento em um edifício, conforme Toledo (1999), dá origem, na superfície externa do mesmo, a zonas de sobrepressão e subpressão, isto é, pressões maiores ou menores do que a pressão do ar na zona a barlavento não afetada pela presença da edificação, conforme representado na Figura 4. A distribuição destas zonas e o valor das pressões ou sucções nos vários pontos de cada uma delas dependem tanto da forma e dimensões do prédio, como da direção e magnitude do vento incidente. A pressão interna provocada pelo vento depende da distribuição e do valor numérico das pressões ou sucções externas e das áreas e localizações das aberturas. A vazão de entrada ou saída de ar é função da área e da forma da abertura e da diferença de pressão existente entre as duas faces da referida abertura.



Fonte: Frota e Schiffer, 2001, p.128.

Figura 4: Ventilação por ação dos ventos.

Quando se deseja um sistema de ventilação natural eficiente em uma edificação, Toledo (1999) recomenda a conjugação da ação do vento com o efeito de chaminé. Para que isto ocorra, é fundamental que a configuração do fluxo de ar, no exterior do prédio, originária da ação do vento, isoladamente, e o sentido do escoamento proveniente das diferenças de temperatura, possam se compor dando a resultante mais favorável ao sistema de ventilação natural.

3 PROJETO DE VENTILAÇÃO NATURAL APLICANDO MÉTODOS APROXIMADOS

3.1 Introdução

O sistema de ventilação natural é de grande importância quando se trata de galpões industriais que se destinam a atividades que envolvem grande geração de calor e de outros alteradores da qualidade do ar. Evidentemente, muitas vezes é inviável se pretender a obtenção de condições de conforto térmico em recintos que abrigam fontes térmicas com grande liberação de calor, como aciarias, fundições, fábricas de vidro, entre outros.

Sendo a temperatura um problema em galpões industriais, que se destinam a processos industriais com grande geração de calor, ou então, no caso de pavilhões localizados em regiões com clima quente, o projeto do sistema de ventilação natural envolve as seguintes etapas:

- Avaliação dos ganhos e perdas de calor a que o ambiente industrial estará submetido;
- Determinação da vazão de ventilação requerida para obtenção das condições de conforto térmico, ou de desconforto consideradas como aceitáveis;
- Dimensionamento do sistema de ventilação natural que proporcione a requerida vazão.

Neste capítulo são abordados os métodos teóricos aproximados para o dimensionamento de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais.

3.2 Carga térmica

A carga térmica é um fator de grande importância em projetos de sistemas de ventilação natural, pois seu conhecimento é necessário para o cálculo da vazão de ar ou taxa de renovação. A carga térmica total, q_T , é dada pela equação,

$$q_T = q_i + q_e \quad (3.1)$$

onde:

q_i = taxa de geração interna de calor devido à pessoas, motores, equipamentos, iluminação, etc, (kcal/h);

q_e = taxa de transferência de calor com o exterior, ganho (+), perda (-), (kcal/h).

As fontes de calor podem ser classificadas segundo Frota e Schiffer (2001), da seguinte forma:

- **Presença humana:** o calor gerado pelos ocupantes depende de sua atividade física (metabolismo) e do número de pessoas usuárias do ambiente;
- **Sistemas de iluminação artificial:** o calor gerado pela iluminação é dissipado por radiação, para as superfícies circundantes, por condução, através dos materiais adjacentes, e por convecção para o ar. Porém, como a luz também se transforma em calor depois de absorvida pelos materiais, no caso de iluminação com lâmpadas incandescentes adota-se como carga térmica a potência instalada e para fluorescentes 125%, o que se refere à potência nominal total mais 25% referentes aos reatores;
- **Motores e equipamentos:** o calor dissipado por motores para o ambiente é função de sua potência e de suas características. Em geral os motores de potência mais baixa tem menor rendimento. No que se refere aos equipamentos, recomenda-se adotar como calor cedido ao ambiente cerca de 60% da potência nominal dos aparelhos elétricos;
- **Processos industriais:** existem processos industriais que envolvem grandes cargas térmicas, a exemplo de siderurgias, metalurgias, fabricação de vidros, etc.
- **Insolação:** o sol, incidindo sobre os parâmetros do edifício, vai representar, em maior ou menor escala, um ganho de calor. Esse ganho de calor depende da orientação e do tipo de abertura, assim como das suas respectivas proteções solares utilizadas e das características térmicas dos materiais que compõe a edificação.

3.3 Cálculo da vazão de ar através de aberturas

A vazão de ar através das aberturas de um edifício pode ser admitida como um caso particular da vazão através de orifícios existentes em placas finas e interpostas em uma canalização, quando o quociente do diâmetro do orifício pelo diâmetro do tubo é zero. Isto é o mesmo que admitir que o diâmetro do tubo onde foi colocada a placa com orifício é infinito.

Com base nesta hipótese, a equação que permite calcular o volume de ar que passa através do orifício, na unidade de tempo, é a seguinte:

$$Q = K \cdot A_n \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{ar}}} \quad (3.2)$$

onde:

Q = vazão de ar (m³/s);

K = coeficiente de vazão ou coeficiente de descarga;

A_n = área do orifício: área livre para passagem do ar no caso de aberturas (m²);

Δp = diferencial de pressão através do orifício, sendo a meia altura no caso de aberturas, (Pa);

ρ_{ar} = massa específica do ar que passa pelo orifício (kg/m³).

A equação anterior é a expressão básica para o cálculo de vazão em aberturas, da qual fazem uso os métodos aproximados, onde o diferencial de pressão através da abertura é o produzido pelo efeito chaminé, ou pelo efeito dos ventos, ou então, por ambos efeitos.

O coeficiente de descarga K é uma medida da eficiência do orifício (abertura) à passagem do ar. Em orifícios com bordas não arredondadas, o coeficiente de descarga é quase independente do número de Reynolds e possui um valor de 0,61 (AWBI, 1998).

Em acordo com Awbi (1998), para a maioria das aberturas em edificações, K não permanece constante e igual a 0,61, como consequência da geometria das aberturas e da variação de pressão, ou seja, da variação do número de Reynolds, com as condições ambientais fora e dentro da edificação. Quanto maior a variação de pressão numa abertura, maior é a velocidade e maior é o número de Reynolds. O Quadro 3, fornece os valores do coeficiente de vazão para algumas aberturas típicas.

ABERTURA	K
Veneziana com 50% de área livre	0,40
Basculante com chapas a 60°	0,58
Abertura com bordos vivos	0,62
Aberturas com bordos arredondados	0,85

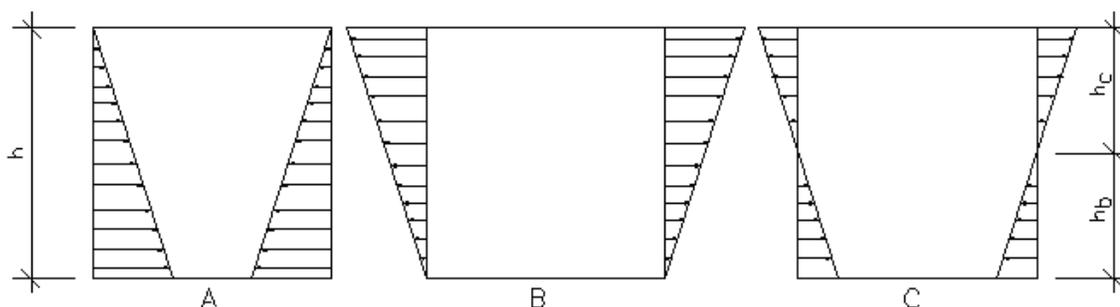
Fonte: Adaptado de Idel' Cik, 1969 apud Clezar e Nogueira, 1999, p.105.

Quadro 3 – Coeficientes de Vazão.

A norma inglesa BS5925 (apud AWBI, 1998), sugere o emprego da equação (3.2) para aberturas com dimensão característica maior que um (1) centímetro (cm), onde o escoamento tende a ser aproximadamente turbulento em condições normais de pressão.

3.4 Cálculo da diferença de pressão e vazão de ar por efeito chaminé

Para definir a expressão da diferença de pressões gerada pelo efeito chaminé considera-se uma caixa cúbica de aresta h , em que o ar interno tem a temperatura t_i maior que a do ar externo, cuja temperatura é t_e , conforme representado na Figura 5.



Fonte: Toledo, 1999, p.71.

Figura 5: Diferença de pressão nas paredes verticais para $t_i > t_e$.

Fazendo uma fenda horizontal, imediatamente abaixo da face superior do cubo (Figura 5-A), as pressões no exterior e no interior ao longo do rasgo igualam-se e não haverá circulação de ar. A uma mesma cota, abaixo do rasgo, as pressões externa e interna sobre as paredes verticais serão diferentes, e a diferença das pressões irá aumentando à medida que se afasta da cota do rasgo. Na base das faces verticais, as pressões serão dadas pelas seguintes expressões:

$$p_e = p_0 + \rho_e \cdot g \cdot h \quad (3.3)$$

$$p_i = p_0 + \rho_i \cdot g \cdot h \quad (3.4)$$

onde:

p_e = pressão na face externa, (Pa);

p_i = pressão na face interna, (Pa);

p_0 = pressão na cota do rasgo, (Pa);

ρ_e, ρ_i = massa específica do ar externo e interno, respectivamente, (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade, ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Como a temperatura do ar interno é mais elevada do que a do ar externo, a massa específica do ar interno é menor do que do ar externo; o peso da coluna de ar interno é inferior ao peso da coluna do ar externo e, portanto, a pressão interna é inferior à externa, na mesma cota. Diz-se que no interior do cubo há um estado de sub-pressão, de depressão ou de rarefação.

A diferença de pressão, em (Pa), na base das paredes do cubo será, então:

$$\Delta p = p_e - p_i = (\rho_e - \rho_i)g \cdot h \quad (3.5)$$

Da equação anterior, pode-se concluir que, para uma dada condição de temperatura externa e interna, a diferença de pressão depende do afastamento, na vertical, do ponto ou seção de igual pressão.

Admitindo-se agora que a fenda seja feita próximo à base do cubo (Figura 5-B), as pressões interna e externa igualam-se no rasgo inferior e não haverá circulação de ar. No topo das faces laterais as pressões serão dadas pelas equações:

$$p_e = p_0 - \rho_e \cdot g \cdot h \quad (3.6)$$

$$p_i = p_0 - \rho_i \cdot g \cdot h \quad (3.7)$$

As pressões decrescem à medida que se afastam da base, e decrescem mais rapidamente no exterior do que no interior, porque a coluna de ar externo, de temperatura mais baixa, tem peso maior do que a equivalente coluna de ar interno e, portanto, a pressão interna é superior à externa, na mesma cota. Diz-se que no interior do cubo há um estado de sobre-pressão ou de compressão.

A diferença de pressão, em (Pa), no topo será:

$$\Delta p = p_e - p_i = -(\rho_e - \rho_i)g \cdot h \quad (3.8)$$

Admitindo-se agora, uma fenda horizontal próximo à face superior e outra próxima à face inferior (Figura 5-C), haverá sub-pressão na parte de baixo e sobre-pressão na parte de cima. Nestas condições, o ar penetrará no cubo pela fenda inferior e sairá pela fenda de cima.

Em um certo ponto da vertical dá-se a passagem da região de sub-pressão do ar interno para a região de sobre-pressão. Esta altura, onde é nula a pressão entre o exterior e interior da parede, foi denominada por Emswiler e Randall (apud TOLEDO, 1999) de zona neutra. Fazendo-se, nesta cota, uma pequena abertura na parede, por ela não haverá fluxo de ar do interior para o exterior ou vice-versa.

O cálculo da diferença de pressão, em (Pa), é feito com o emprego da mesma equação já vista:

$$\Delta p = (\rho_e - \rho_i)g.h \quad (3.9)$$

sendo que o valor de h deve ser medido acima da linha neutra representado por h_c e abaixo da linha neutra representado por h_b , como mostra a Figura 5-C, o que equivale a dizer que h_c será positiva e h_b será negativa.

Na prática, a posição da zona neutra é função da distribuição e características das aberturas, o que raramente é conhecido.

Para a determinação da vazão de ar por efeito chaminé serão consideradas duas situações particulares:

- a) Considere-se o caso de uma edificação com duas aberturas idênticas, separadas verticalmente por uma distância h . A diferença de pressão através das aberturas é (Figura 6):

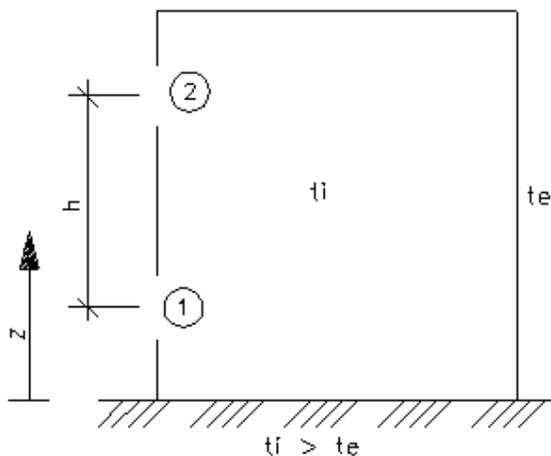


Figura 6: Edificação com duas aberturas separadas verticalmente por uma distância h .

$$\Delta p_1 = p_{e0} - p_{i0} - (\rho_e - \rho_i)g \cdot z_1 \quad (3.10)$$

$$\Delta p_2 = p_{e0} - p_{i0} - (\rho_e - \rho_i)g(z_1 + h) \quad (3.11)$$

sendo:

Δp_1 = diferença de pressão através da abertura de entrada (1), (Pa);

Δp_2 = diferença de pressão através da abertura de saída (2), (Pa);

p_{e0} = pressão externa de referência, (Pa);

p_{i0} = pressão interna de referência, (Pa);

ρ_e = densidade do ar externo, (Kg/m³);

ρ_i = densidade do ar interno, (Kg/m³);

g = aceleração da gravidade, (9,81 m/s²);

h = distância entre os centros das aberturas de entrada e saída de ar (m);

Considerando regime permanente, e pela equação de continuidade, a vazão de massa de entrada deve ser igual à vazão de massa de saída. Mais ainda, considerando que ambas aberturas são idênticas, a condição de igualdade das vazões de entrada e saída só pode ser satisfeita se $\rho_e \Delta p_1 = -\rho_i \Delta p_2$. Aproximando a expressão anterior a $\Delta p_1 = -\Delta p_2$ resulta:

$$p_{e0} - p_{i0} = (\rho_e - \rho_i)g \left(\frac{h}{2} + z_1 \right) \quad (3.12)$$

e

$$\Delta p_1 = |\Delta p_2| = (\rho_e - \rho_i)g \left(\frac{h}{2} \right) \quad (3.13)$$

A equação anterior indica que a zona neutra encontra-se a meia altura entre as aberturas. A vazão (volumétrica) de ar de entrada ou de saída é obtida substituindo Δp na equação 3.2, isto é:

$$Q = K.A \sqrt{\frac{(\rho_e - \rho_i)}{\rho_{ar}} g \cdot h} = KA \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_{ar}} g \cdot h} \quad (3.14)$$

ou

$$Q = K.A \sqrt{g \cdot h \cdot \left(\frac{\Delta T}{T} \right)} \quad (3.15)$$

onde:

A = área da abertura de entrada ou saída de ar, supostas iguais, (m²);

$\Delta \rho = \rho_e - \rho_i$ = diferença entre as densidades do ar externo e interno, (Kg/m³);

$\Delta T = T_i - T_e$ = diferença entre as temperaturas absolutas do ar interno e externo, (K);

T = temperatura absoluta do ar externo ou interno, (K).

A expressão (3.15) se deduz da (3.14), aceitando que:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T} \quad (3.16)$$

Observar que o $\Delta\rho$ foi definido como $(\rho_e - \rho_i)$ e o Δt como $(t_i - t_e)$, e isto explica porque não aparece o sinal negativo na frente do $(-\Delta\rho/\rho)$ ou de $(-\Delta T/T)$.

- b) Considere-se o caso de um edifício com duas aberturas de diferentes áreas (A_1 e A_2), mas com igual coeficiente de descarga (Figura 6). Desta vez, a equação da conservação da massa, conduz a:

$$\rho_e \cdot A_1^2 \cdot \Delta p_1 = -\rho_i \cdot A_2^2 \cdot \Delta p_2 \quad (3.17)$$

expressão que pode ser aproximada a:

$$A_1^2 \cdot \Delta p_1 = -A_2^2 \cdot \Delta p_2 \quad (3.18)$$

Então:

$$p_{e0} - p_{i0} = \frac{(\rho_e - \rho_i)g \left[z_1 \left(1 + \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) + h \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \right]}{1 + \frac{A_2^2}{A_1^2}} \quad (3.19)$$

e

$$\Delta p_1 = (\rho_e - \rho_i)g \cdot h \left[\frac{\frac{A_2^2}{A_1^2}}{1 + \frac{A_2^2}{A_1^2}} \right] \quad (3.20)$$

A equação anterior indica que a zona neutra depende da relação entre as áreas da abertura de saída e entrada de ar, como é indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Posição da zona neutra em função da relação área da abertura de saída e área da abertura de entrada de ar.

$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{\frac{A_2^2}{A_1^2}}{\left(1 + \frac{A_2^2}{A_1^2}\right)h}$
0,5	0,2 h
1,0	0,5 h
2,0	0,8 h
3,0	0,9 h

A vazão volumétrica de entrada é obtida substituindo-se Δp_1 na equação (3.2), ou seja:

$$Q_1 = K.A_1 \sqrt{\frac{2.\Delta p_1}{\rho_{ar}}} = K.A_1 \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_{ar}}} g.h \sqrt{\frac{2.A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (3.21)$$

ou

$$Q_1 = K \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_{ar}}} .g.h. \sqrt{\frac{2}{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2}}} \quad (3.22)$$

Comparando as equações (3.14) e (3.21) deduz-se que:

$$\frac{Q_{A_1 \neq A_2}}{Q_{A_1 = A_2}} = \sqrt{\frac{2.A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (3.23)$$

A equação anterior indica que quando as áreas das aberturas não são iguais se produz um incremento de vazão em relação à condição $A_1=A_2$, conforme é indicado na Tabela 2 e Figura 7.

Tabela 2 – Incremento de vazão de ar para áreas de aberturas desiguais.

$\frac{A_2}{A_1} = \frac{A_{maior}}{A_{menor}}$	$\frac{Q_{A_1 \neq A_2}}{Q_{A=A_2}}$
1 (1)	1,00
1/2 (2)	1,26
1/3 (3)	1,34
1/4 (4)	1,37
1/5 (5)	1,38
1/6 (6)	1,39
∞	limite = $\sqrt{2} \approx 1,41$

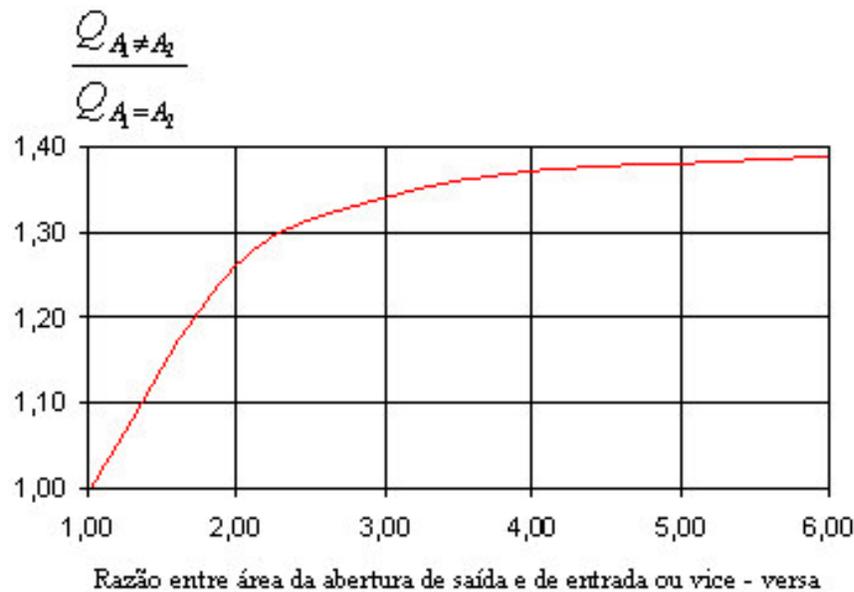


Figura 7: Gráfico de incremento de vazão de ar causado pelo fato das aberturas não serem iguais.

3.5 Cálculo da diferença de pressão e vazão de ar por efeito dos ventos

A diferença de pressão, Δp em (Pa), entre o lado externo e o interno de uma abertura, gerada pela ação ou efeito do vento, pode ser calculada a partir de:

$$\Delta p = p_e - p_i = (c_{p_e} - c_{p_i}) \cdot q \quad (3.24)$$

onde:

p_e = pressão efetiva no lado externo da abertura, (Pa);

p_i = pressão efetiva no lado interno da abertura, (Pa);

$q = 1/2 \rho_{ar} (V_\infty)^2$ = pressão dinâmica de referência (Pa);

V_∞ = velocidade média do vento, não perturbado, na cota de referência, (m/s);

cp_e e cp_i : coeficientes de pressão médios (sobre a área da abertura), externo e interno, respectivamente.

Substituindo Δp na equação (3.2) pode-se calcular a vazão de ar em (m^3/s) através de uma abertura de área A em (m^2), pelo efeito do vento:

$$Q = K.A.\sqrt{\frac{2}{\rho_{ar}}|cp_e - cp_i|}q = K.A.V\sqrt{|cp_e - cp_i|}. \quad (3.25)$$

Em princípio, cp_e pode ser obtido de Normas de vento e outras fontes. Entretanto, cp_i para uma mesma edificação depende, da direção do vento (média temporal) e da distribuição e características das aberturas. A pressão interna efetiva p_i , ou então, cp_i , pode ser obtida considerando que em condição de regime permanente a massa, ou volume de ar (já que $t_i=t_e$), devido à consideração somente da ação do vento que entra na edificação na unidade de tempo deve ser igual a que sai. Isto é:

$$\sum_{i=1}^n \left[\pm A_j \sqrt{|cp_{ej} - cp_i|} \right] = 0 \quad (3.26)$$

onde:

A_j = área de uma abertura ou de um conjunto de aberturas para as quais pode ser adotado um mesmo valor de cp_{ej} .

Admitindo um único valor de pressão interna, cp_i pode ser calculado por aproximações sucessivas, arbitrando-se valores de cp_i na equação (3.26). Evidentemente, nessa expressão, admite-se que K , ρ_{ar} e q são únicos para todas as aberturas.

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

Este procedimento para calcular cp_i , é o adotado pela Norma NBR-6123/1988 – Forças devido ao vento em edificações.

Para a determinação da vazão de ar por efeito dos ventos serão consideradas duas situações particulares:

- a) Considere-se o caso de uma edificação com duas aberturas idênticas, uma localizada a barlavento: região de onde sopra o vento, em relação à edificação, e a outra a sotavento: região oposta àquela de onde sopra o vento, em relação à edificação, (Figura 8).

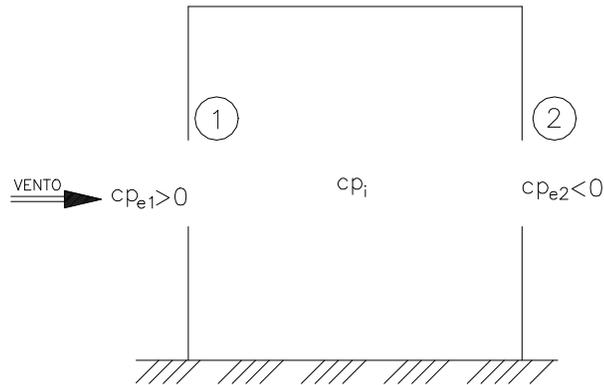


Figura 8: Edificação com duas aberturas, uma a barlavento e a outra a sotavento.

Aplicando a equação (3.26), resulta:

$$cp_i = (cp_{e1} + cp_{e2})/2 \quad (3.27)$$

Substituindo na equação (3.25), temos:

$$Q_1 = K.V.A_{eq}\sqrt{cp_{e1} - cp_{e2}} \quad (3.28)$$

onde:

Q_1 = vazão volumétrica de ar pela abertura a barlavento, (m³/s);

A_{eq} = área equivalente das aberturas, (m²);

$A_{eq} = A\sqrt{2}$;

V = velocidade média do vento à barlavento, (m/s);

cp_{e1} = coeficiente de pressão externo à barlavento;

cp_{e2} = coeficiente de pressão externo à sotavento;

A = área da abertura de entrada ou saída de ar, supostas iguais, (m²).

- b) Considere-se o caso de um edifício com duas aberturas de diferentes áreas (A_1 e A_2) em (m²), mas com igual coeficiente de descarga (Figura 8). Aplicando a equação (3.26), resulta:

$$cp_i = \frac{A_1^2 \cdot cp_{e1} + A_2^2 \cdot cp_{e2}}{A_1^2 + A_2^2} \quad (3.29)$$

Substituindo na equação (3.25), temos que a vazão de entrada de ar em (m³/s):

$$Q_1 = K.A_1.V\sqrt{cp_{e1} - \frac{A_1^2 \cdot cp_{e1} + A_2^2 \cdot cp_{e2}}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (3.30)$$

Operando com a equação anterior, obtêm-se:

$$Q_1 = K.V \sqrt{cp_{e1} - cp_{e2}} \sqrt{\frac{A_1^2 \cdot A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (3.31)$$

ou

$$Q_1 = K.A_{eq} V \sqrt{cp_{e1} - cp_{e2}} \quad (3.32)$$

onde, a área equivalente de aberturas, A_{eq} em (m²), resulta:

$$A_{eq} = \sqrt{\frac{A_1^2 \cdot A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad (3.33)$$

ou

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} \quad (3.34)$$

3.6 Cálculo da vazão de ar por efeito simultâneo (efeito chaminé e ação do vento):

A vazão de ar através de uma abertura é proporcional a raiz quadrada da diferença de pressão (vide equação 3.2), desta vez, gerada pelo efeito chaminé e pelo vento. Então, a vazão total Q_t , considerando ambos efeitos, através da dedução de equações e citado também pela ASHRAE (2001), resulta:

$$Q_t = \sqrt{Q_c^2 + Q_v^2} \quad (3.35)$$

onde:

Q_c = vazão de ar pelo efeito chaminé;

Q_v = vazão de ar pelo efeito do vento.

Tirando Q_c da raiz, temos:

$$Q_t = Q_c \sqrt{1 + \left(\frac{Q_v}{Q_c}\right)^2} \quad (3.36)$$

Atribuindo valores a $Q_c/(Q_c+Q_v)$ e a $Q_v/(Q_c+Q_v)$, como indicado na Tabela 3 e conforme a equação (3.36), pode-se obter o gráfico da Figura 9.

Tabela 3 – Determinação das vazões totais (efeito chaminé e ação do vento).

$\frac{Q_c}{Q_c + Q_v}$	$\frac{Q_v}{Q_c + Q_v}$	$\frac{Q_v}{Q_c}$	$\frac{Q_t}{Q_c}$
0,1	0,9	9	9,05
0,2	0,8	4	4,12
0,4	0,6	1,5	1,80
0,6	0,4	0,66	1,20
0,8	0,2	0,25	1,03

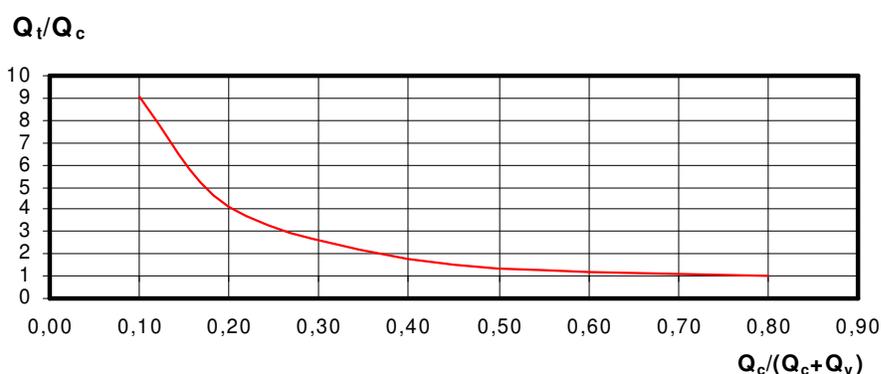


Figura 9: Gráfico para a determinação da vazão total (efeito chaminé + ação dos ventos).

3.7 Métodos aproximados

A seguir são apresentados os métodos encontrados na bibliografia consultada.

Equação de Emswiler, 1926 (FROTA, 1989):

Segundo Emswiler, o fluxo de ar através de cada abertura, por efeito chaminé, pode ser calculada por meio da seguinte fórmula:

$$Q = A_n \sqrt{\frac{h_{nz} \cdot \Delta t_{nz}}{R \cdot T}} \quad (3.37)$$

com

$$R = \frac{1}{2 \cdot g \cdot K^2 \cdot 60^2} \quad (3.38)$$

onde:

Q = vazão de ar, (ft³/min);

A_n = área da abertura, em (ft²);

h_{nz} = distância da zona neutra ao centro da abertura, em (ft), sendo que a posição da zona neutra, deve ser determinada pelo método de tentativa e erro ;

Δt_{nz} = diferença entre as temperaturas do ar que passa pela abertura e do ar da zona neutra, (°F),

g = aceleração da gravidade (32,2 ft/s²);

K = coeficiente de descarga (0,60 – 0,65),

T = temperatura absoluta do ar que passa através da abertura, em graus Rankine (°R).

Equações de Randall e Canover, 1931 (FROTA, 1989):

Randall e Canover simplificaram o método de Emswiler, desenvolvendo uma fórmula válida para edificações com duas aberturas iguais, uma localizada na parte baixa e outra na parte alta da edificação. Neste caso, é aceito que o gradiente de temperatura no interior da edificação seja linear, e que a “zona neutra” ocorrerá à meia altura do edifício, e ainda que o coeficiente de descarga seja 0,65 e a temperatura absoluta seja 550 °R (32,55°C), concluíram que: em unidades britânicas:

$$Q = 9,4.A\sqrt{h.\Delta t} \quad (3.39)$$

ou, para unidades no sistema internacional:

$$Q = 0,116.A\sqrt{h.\Delta t} \quad (3.40)$$

onde:

Q = vazão de ar, em (ft³/min) na equação (3.39), em (m³/s) na equação (3.40);

A = área da abertura de entrada ou de saída, em (ft²) na equação (3.39), em (m²) na equação (3.40);

h = distância vertical entre a abertura de entrada e de saída do ar, em (ft) na equação (3.39), em (m) na equação (3.40);

Δt = diferença entre as temperaturas do ar que sai e que entra no edifício, em (°F) na equação (3.39), em (°C) na equação (3.40).

Quando as aberturas de entrada e saída não possuem áreas iguais, Randall e Canover, construíram uma curva de correção análoga à apresentada na Figura 7.

Equações do C.S.T.B., 1958 (FROTA, 1989):

O C.S.T.B. (Centre Scientifique et Technique du Batiment de Paris) apresenta a seguinte expressão, da vazão de ar por efeito chaminé, deduzida considerando que o movimento do ar é laminar:

$$Q = K_0.A_0\sqrt{h.\Delta t} \quad (3.41)$$

onde:

Q = fluxo de vazão de ar, em (m³/s);

$K_0 = 0,18\sqrt{kg^2 / s^2 m^5 \text{ } ^\circ K}$, para os casos mais correntes;

A_0 = área efetiva das aberturas de entrada e de saída do ar em (m²), dentro da seguinte proporção:

$$\frac{1}{A_0^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (3.42)$$

A_e = área das aberturas de entrada de ar, em (m²);

A_s = área das aberturas de saída de ar, (m²);

h = distância vertical entre as alturas médias das aberturas de entrada e de saída do ar, (m);

Δt = diferença entre as temperaturas do ar que sai e que entra no edifício, em (°C).

Equações da ASHRAE, 2001:

A ASHRAE recomenda o uso das mesmas fórmulas estabelecidas por Randall e Canover, para o cálculo da vazão de ar por efeito chaminé, inclusive sugere o uso da Figura 7 para determinar o incremento na vazão de ar causado pelo fato de uma abertura ser maior que a outra.

Quanto à ventilação por ação do vento, a ASHRAE apresenta a seguinte equação:

$$Q = E.A.V \quad (3.43)$$

sendo:

Q = vazão de ar por efeito do vento, (ft³/min);

A = área livre da abertura de entrada de ar, (ft²);

V = velocidade média do vento, (ft/min);

E = efetividade da abertura, (0,5 a 0,6 – para vento perpendicular à abertura, e 0,25 a 0,35 para vento na diagonal).

Para a determinação da vazão de ar, por ação simultânea do efeito chaminé e da ação do vento, ASHRAE sugere o uso da Figura 9.

Clarke, 1958 (apud Frota 1989), emprega as equações da ASHRAE, mas não considera os efeitos do vento e de aberturas desiguais.

A A.I.H.A. – American Industrial Hygiene Association, 1975 (apud Frota 1989), apesar de se referir a ASHRAE, adota as mesmas equações de Randall e Canover, sem considerar o efeito dos ventos.

Macintyre (1990) e Mesquita e Guimarães (1988), também empregam as equações da ASHRAE, tanto para o dimensionamento da vazão pelo efeito chaminé, levando-se em consideração o caso de aberturas desiguais, como para o cálculo pelo efeito dos ventos e efeito simultâneo (efeito chaminé + ação do vento).

Equação da A.I.S.I., 1965 (FROTA, 1989):

A AISI (American Iron Steel Institute, através de sua publicação ‘Steel Mill Ventilation’, 1965) estabeleceu a seguinte equação, da vazão de ar por efeito chaminé:

$$Q = 132.A.K \sqrt{\frac{h.\Delta t}{\rho.T}} \quad (3.44)$$

onde:

Q = vazão de ar, em (ft³/min);

A = área total da abertura de entrada ou de saída, tomada a menor, (ft²);

K = coeficiente de descarga da abertura (0,60 – 0,65);

h = distância vertical entre as aberturas de entrada e de saída de ar, (ft);

Δt = diferença entre a temperatura do ar que entra no edifício e do ar que sai, (°F);

ρ = massa específica do ar, (lb/ft³);

T = temperatura absoluta do ar que passa através da abertura, (°R).

Equações de Constance, 1966 (FROTA, 1989):

Constance apresenta as seguintes equações, para calcular a vazão de ar por efeito chaminé e do vento, sendo que (30,83 V) é a parcela relativa ao vento:

$$Q = A(9,4\sqrt{h.\Delta t} + 30,83.V) \quad (3.45)$$

ou

$$Q = A_0(10,2\sqrt{h.\Delta t_{avg}} + 30,83.V) \quad (3.46)$$

onde:

Q = vazão de ar, (ft³/min);

A_0 = área da abertura de entrada, (ft²);

A = área de abertura de entrada ou de saída consideradas iguais, (ft²);

h = distância vertical entre a abertura de entrada e de saída de ar, (ft);

Δt_{avg} = diferença entre a temperatura média dentro do edifício e a do ar que entra no edifício, (°F).

Δt = diferença entre a temperatura do ar que entra no edifício e do ar que sai, (°F);

V = velocidade do vento, em m.p.h.

Constance aplica ainda a correção para aberturas desiguais, segundo Figura 7.

Equações de Toledo, 1967 (FROTA, 1989; TOLEDO, 1999):

Toledo, para o cálculo da vazão de ar por efeito chaminé através de uma abertura, apresenta a seguinte equação:

$$Q = 0,16.A_n \sqrt{h_{nz} \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.47)$$

onde:

Q = vazão de ar, (m³/s);

A_n = área da abertura, (m²);

h_{nz} = distância vertical da zona neutra, até o centro da abertura, em (m);

Δt_{avg} = diferença de temperatura do ar interno e externo, (°C).

Quando todas as aberturas de entrada e saída de ar têm seus centros praticamente na mesma cota, a equação de vazão de ar pode ser expressa na forma:

$$Q = 0,16 \sqrt{\frac{h \cdot \Delta t_{avg}}{\frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2}}} \quad (3.48)$$

onde:

h = distância vertical entre os centros das aberturas de saída e entrada de ar, (m);

A_e = área das aberturas de entrada de ar, (m²);

A_s = área das aberturas de saída de ar, (m²);

Δt_{avg} = diferença de temperatura do ar interno e externo, em (°C).

Quando as aberturas de entrada e saída possuem áreas iguais, ou seja, $A_e = A_s$, a equação anterior toma a forma:

$$Q = 0,16.A \sqrt{\frac{h \Delta t_{avg}}{2}} = 0,113.A \sqrt{h \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.49)$$

Toledo sugere as seguintes expressões, para a determinação da vazão de ar por efeito dos ventos, Q , em (m³/s):

$$Q = 0,6.A_{eq} \cdot V \sqrt{c_e - c_s} \quad (3.50)$$

onde:

a área equivalente das aberturas, A_{eq} , em (m²), é dada por:

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \dots + \frac{1}{A_i^2} \quad (3.51)$$

V = velocidade do vento, (m/s)

c_e, c_s = coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída de ar, respectivamente.

Para a ação simultânea do efeito chaminé e da ação do vento, Toledo (1999), considera que não existem condições de generalização, e aponta exemplos em que a ação do vento é coadjuvante ou prejudicial.

Equação de Van Straaten, 1967 (FROTA, 1989):

Van Straaten especificou para o dimensionamento do fluxo de ventilação por efeito chaminé, a seguinte equação:

$$Q = K_0 \cdot A \cdot \sqrt{h \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.52)$$

onde:

Q = vazão de ar, (ft³/min);

A = área livre das aberturas de entrada e de saída de ar, consideradas como iguais, (ft²);

h = distância vertical entre as aberturas de entrada e de saída de ar, (ft);

K_0 = constante, que pode variar entre 7 e 9, dependendo do tipo de resistência das aberturas (para casos médios, adotar 8);

Δt_{avg} = diferença entre as temperaturas média do ar dentro do edifício e do ar externo ao edifício, (°F).

Equação de Fan Engineering, 1970 (FROTA, 1989):

Fan Engineering adota a seguinte equação para o cálculo de vazão de ar por efeito chaminé:

$$Q = 10 \cdot A \cdot \sqrt{h \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.53)$$

onde:

Q = vazão de ar, em (ft³/min);

A = área da abertura, em (ft²);

h = distância vertical entre a abertura de entrada e de saída de ar, em (ft);

Δt_{avg} = diferença entre a temperatura média dentro do edifício e do ar que entra no edifício, em (°F).

Além da expressão acima, Fan Engineering sugere as correções para aberturas desiguais e para efeito simultâneo do vento, segundo Figuras 7 e 9.

Equação de Baturin, 1976:

Baturin apresenta a seguinte equação para o cálculo aproximado da vazão de ar por efeito chaminé:

$$Q = 0,117 \cdot A \cdot \sqrt{h \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.54)$$

onde:

Q = vazão de ar, em (m³/s);

A = área de abertura de entrada ou de saída de ar consideradas iguais, em (m²);
 h = altura medida entre as aberturas de entrada e de saída, (m);
 Δt_{avg} = diferença entre a temperatura média do ar interno e a temperatura do ar externo, em (°C).

Equação de Daly, 1978 (FROTA, 1989):

Daly, para o cálculo da ventilação por efeito chaminé, adota a fórmula:

$$Q = 0,17.A_e \sqrt{h.\Delta t} \quad (3.55)$$

onde:

Q = vazão de ar, em (m³/s);
 A_e = área de abertura efetiva, em (m²);
 h = altura medida entre as aberturas de entrada e de saída, em (m);
 Δt = diferença entre a temperatura do ar que entra no edifício e do ar que sai, (°C).

A área efetiva das aberturas, segundo Daly, é dada pela equação:

$$A_e = A_e \sqrt{\frac{A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}} \quad (3.56)$$

onde:

A_s = área de abertura de saída de ar, em (m²);
 A_e = área de abertura de entrada de ar, em (m²).

Equações de Ênio Cruz da Costa, 1982.

Costa indica a seguinte equação para a determinação das áreas das aberturas para entrada ou saída de ar, considerando o efeito chaminé:

$$A = \frac{q_T}{\sqrt{h.\Delta t_{avg}^3}} \sqrt{\frac{\sum \lambda_i.T_e}{3600^2.2g.\gamma^2.Cp^2}} \quad (3.57)$$

onde:

A = área das aberturas de entrada ou saída, supostas iguais, em (m²);
 γ = peso específico do ar, nas condições de escoamento ($\approx 1,2$ kgf/m³);
 g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
 Δt_{avg} = diferença entre a temperatura do ar interno e a temperatura do ar externo, em (°C);
 T_e = temperatura absoluta do ar externo, (K);
 h = distância vertical medida entre os centros das aberturas de entrada e saída de ar, em (m);
 λ_i = coeficientes de perda de carga da abertura de entrada ou saída do ar (K^{-1/2});
 Cp = calor específico do ar a pressão constante (0,24 Kcal/kg°C);
 q_T = carga térmica total, em (kcal/h);

Para o cálculo da velocidade do ar nas aberturas, c , em (m/s), é sugerida a seguinte expressão:

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \Delta t_{avg}}{\sum \lambda_i \cdot T_e}} \quad (3.58)$$

Além disso, para verificar a elevação de temperatura que resulta num ambiente, Costa emprega:

$$\Delta t_{avg} = \sqrt[3]{\frac{\sum \lambda_i \cdot T_e}{3600^2 \cdot 2g \cdot \gamma^2 \cdot Cp^2}} \sqrt[3]{\frac{q_T^2}{h \cdot A^2}} \quad (3.59)$$

Equações de Frota (FROTA, 1989; FROTA E SCHIFFER, 2000):

Frota (1989) apresenta a seguinte equação para a determinação da vazão de ar por efeito chaminé:

$$Q = K_o \cdot A \sqrt{h \cdot \Delta t} \quad (3.60)$$

onde:

Q = vazão de ar, (m³/s);

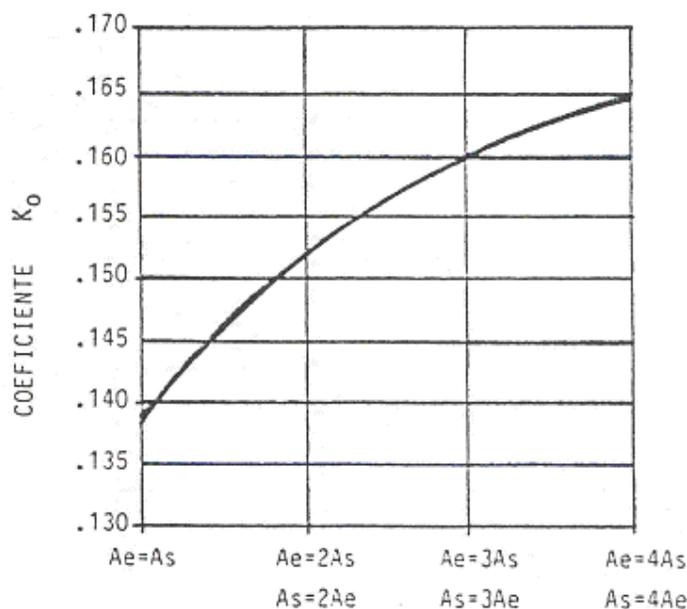
A = área total da abertura de entrada ou de saída, tomada a menor, (m²);

h = distância vertical entre as aberturas de entrada e de saída de ar, (m);

Δt = diferença entre a temperatura do ar que sai e do ar que entra no edifício, (°C);

K_o = coeficiente que engloba uma série de fatores, como aceleração da gravidade, densidade do ar, perda de carga, mas que será chamado de coeficiente de perda de carga.

A Figura 10 apresenta a variação do coeficiente K_o , segundo a relação $\frac{A_e}{A_s}$ ou $\frac{A_s}{A_e}$.



Fonte: Frota, 1989, p.132.

Figura 10: Curva de variação do coeficiente K_0 segundo a variação da relação A_e/A_s .

Frota e Schiffer (2001), quanto ao efeito dos ventos, sugerem a equação:

$$Q = K \cdot A_{eq} \cdot v \cdot \sqrt{(c_e - c_s)} \quad (3.61)$$

onde:

Q = vazão de ar pela ação dos ventos, (m^3/s);

K = coeficiente de perda de carga (0,6);

A_{eq} = área equivalente das aberturas, em (m^2);

v = velocidade do vento externo resultante na abertura, (m/s)

c_e = coeficiente de pressão na abertura de entrada de ar;

c_s = coeficiente de pressão na abertura de saída de ar.

No que se refere a A_{eq} , será função das áreas das aberturas de entrada e de saída, conforme a equação (3.42).

No caso de o vento não ser normal às fachadas da edificação:

$$v = V \cdot \cos \theta \quad (3.62)$$

sendo:

V = velocidade do vento externo;

θ = ângulo de incidência do vento em relação à normal da fachada.

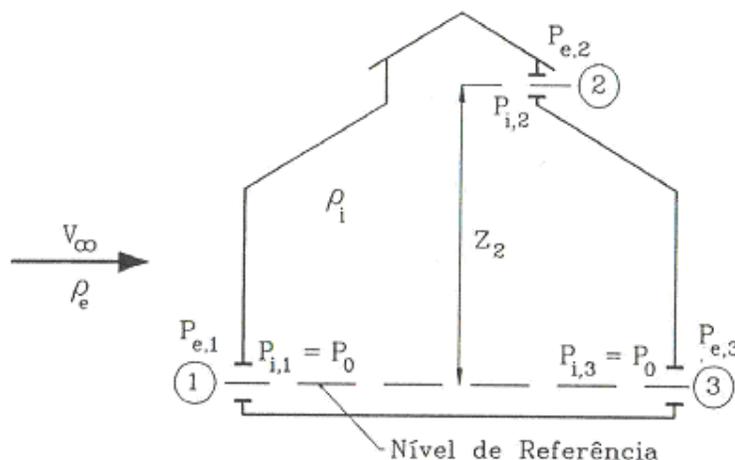
Frota e Schiffer (2001), quanto à ventilação por efeito simultâneo do vento e chaminé recomenda o emprego do gráfico da Figura 9.

Equações de Clezar e Nogueira (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999):

Clezar e Nogueira (1999) apresentam uma metodologia que permite calcular a vazão de ar, considerando o efeito chaminé, o efeito dos ventos, ou então, ambos efeitos simultaneamente, através de uma formulação única. Mais ainda, esta formulação aplica-se a qualquer número e distribuição da aberturas.

As hipóteses simplificativas, adotadas na formulação de Clezar e Nogueira (1999), são:

- Regime permanente: com esta hipótese, ignora-se qualquer flutuação na intensidade e na direção do vento, desconsidera-se qualquer oscilação de temperatura externa e interna e não se levam em conta, também, possíveis alterações decorrentes do fechamento de algumas aberturas.
- Perda de carga no escoamento interno desprezível: esta hipótese é bastante razoável, tendo-se em vista a magnitude bastante grande da seção transversal implicando uma baixa velocidade do escoamento nestes ambientes.



Fonte: Clezar e Nogueira, 1999, p.106.

Figura 11: Cotas e parâmetros físicos para o ar.

A formulação será apresentada para o pavilhão indicado na Figura 11, onde ρ_e e ρ_i representam as massas específicas do ar, correspondentes às temperaturas médias externas e internas, respectivamente. A pressão p_0 será a pressão efetiva do ar interno na cota estabelecida como sendo o nível de referência. As pressões $p_{e,j}$ e $p_{i,j}$ são as pressões efetivas junto à abertura "j", na cota z_j , correspondentes aos lados externo e interno, respectivamente.

(a) Algoritmo para o cálculo da vazão:

Neste tipo de problema são conhecidas a intensidade e a direção do vento, a temperatura e a pressão externa do ar, e conseqüentemente sua massa específica, os coeficientes de pressão, as áreas e as cotas de cada abertura. Considera-se também conhecida a temperatura média do ar interno ou a carga térmica sensível do ambiente. A seguir é apresentada a seqüência dos cálculos:

(1) No caso de não ser conhecida a temperatura média interna, calcular a massa específica ρ_i , a partir de um valor estimado desta temperatura;

(2) Calcular as pressões externas, (vento + desnível), junto a cada abertura, considerando os desníveis em relação a um nível de referência, onde a pressão efetiva externa da atmosfera será nula. Assim, a pressão externa em cada abertura será obtida pela expressão abaixo;

$$p_{e,j} = c_{p,j} \cdot \frac{1}{2} \rho_e \cdot V_\infty^2 - \rho_e \cdot g \cdot z_j \quad (3.63)$$

(3) Expressar as pressões internas junto a cada abertura, em função da pressão interna no nível de referência, p_o ;

$$p_{i,j} = p_o - \rho_i \cdot g \cdot z_j \quad (3.64)$$

(4) Estabelecer os $\Delta p_j = (p_{e,j} - p_{i,j})$, para cada abertura;

(5) Determinar p_o pela aplicação da equação da continuidade;

$$\sum_{j=1}^n K_j \cdot A_j \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot |\Delta p_j|} \cdot \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (3.65)$$

onde “n” representa o número total de aberturas.

O Δp_j foi considerado em módulo para se evitar o surgimento de um sinal negativo no radicando. O quociente $\Delta p_j / |\Delta p_j|$ foi introduzido para se levar em conta os sinais das parcelas do balanço de massa. Além disto, nesta equação,

$$\rho_{ar} = \rho_e, \text{ se } \Delta p_j > 0 \quad (3.66)$$

$$\rho_{ar} = \rho_i, \text{ se } \Delta p_j < 0 \quad (3.67)$$

(6) Calcular as vazões por:

$$Q_j = K_j \cdot A_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta p_j|}{\rho_{ar}}} \cdot \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} \quad (3.68)$$

No caso de a temperatura interna ter sido estimada, torna-se necessário verificar se o Δt resultante da estimativa confere, com uma certa tolerância, com aquele obtido com o emprego da equação (2.1), em caso negativo, deve-se continuar o processo iterativo, voltando-se ao passo (1).

(b) Algoritmo para o cálculo das áreas:

Neste tipo de problema são conhecidas a intensidade e a direção do vento, a temperatura e a pressão externa do ar, e conseqüentemente sua massa específica, os coeficientes de pressão, a vazão requerida para ventilação, a qual iguala o somatório das vazões de entrada, bem como as cotas de cada abertura, estipulando-se para cada posição, a fração, λ_j , da área total requerida. Considera-se também conhecida a temperatura média do ar interno, e conseqüentemente, sua massa específica. A seguir é apresentada a seqüência dos cálculos:

(1) Calcular as pressões externas, (vento + desnível), junto a cada abertura, considerando os desníveis em relação a um nível de referência, onde a pressão efetiva externa da atmosfera será nula. Assim, as pressões externas em cada abertura serão dadas pela expressão abaixo.

$$p_{e,j} = c_{p,j} \cdot \frac{1}{2} \rho_e \cdot V_\infty^2 - \rho_e \cdot g \cdot z_j \quad (3.69)$$

(2) Expressar as pressões internas junto a cada abertura, em função da pressão interna no nível de referência, p_o .

$$p_{i,j} = p_o - \rho_i \cdot g \cdot z_j \quad (3.70)$$

(3) Estabelecer os $\Delta p_j = (p_{e,j} - p_{i,j})$, para cada abertura;

(4) Determinar p_o pela aplicação da equação da continuidade:

$$A_T \cdot \sum_{j=1}^n K_j \cdot \lambda_j \cdot \sqrt{2 \rho_{ar} \cdot |\Delta p_j|} \cdot \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (3.71)$$

sendo:

$$\lambda_j = \frac{A_j}{A_T} \quad (3.72)$$

$$A_T = \sum_{j=1}^n A_j \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} \rho_{ar} &= \rho_e, \text{ se } \Delta p_j > 0 \\ \rho_{ar} &= \rho_i, \text{ se } \Delta p_j < 0 \end{aligned} \quad (3.74)$$

Como A_T é diferente de zero, resulta:

$$\sum_{j=1}^n K_j \cdot \lambda_j \cdot \sqrt{2\rho_{ar} \cdot |\Delta p_j|} \cdot \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (3.75)$$

(5) Atentando-se para o fato de que o membro esquerdo da equação (3.65), sem a razão $\Delta p_j / |\Delta p_j|$, representa o dobro da vazão mássica de ventilação, $(\rho_e \cdot Q_e)$, pode-se escrever:

$$\sum_{j=1}^n K_j \cdot \lambda_j \cdot A_T \cdot \sqrt{2\rho_{ar} \cdot |\Delta p_j|} = 2 \cdot Q_e \cdot \rho_e \quad (3.76)$$

Mas a área total pode ser representada em função das áreas individuais de cada abertura pela equação,

$$A_T = \frac{A_k}{\lambda_k} \quad (3.77)$$

a qual, quando substituída na equação acima, permite isolar A_k , para se determinar as áreas individuais requeridas para cada posição:

$$A_k = \frac{2 \cdot Q_e \cdot \rho_e \cdot \lambda_k}{\sum_{j=1}^n K_j \cdot \lambda_j \sqrt{2 \cdot \rho_{ar} \cdot |\Delta p_j|}} \quad (3.78)$$

3.8 Equações propostas neste trabalho

Com base nas deduções efetuadas nos itens 3.4, 3.5 e 3.6 deste capítulo, sugere-se a seguinte fórmula para determinação da vazão de ar nas aberturas de entrada, por efeito chaminé:

Considerando o coeficiente de descarga das aberturas $k = 0,61$, têm-se:

$$Q = K\sqrt{g}A_e\sqrt{h\frac{\Delta T}{T}} = 0,61\sqrt{9,81}.A_e\sqrt{h\frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)}} \quad (3.79)$$

Considerando o incremento de vazão devido às aberturas de entrada serem diferentes das aberturas de saída de ar na equação acima, têm-se:

$$Q_{e,c} = 1,91.A_e\sqrt{h\frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)}}\sqrt{\frac{2A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}}. \quad (3.80)$$

onde:

$Q_{e,c}$ = vazão de entrada de ar, em (m³/s);

A_e = área das aberturas de entrada de ar, considerando isoladamente o efeito chaminé, em (m²);

A_s = área das aberturas de saída de ar, considerando isoladamente o efeito chaminé, em (m²);

h = distância vertical entre as aberturas de entrada e de saída de ar, (m);

Δt_{avg} = diferença de temperatura entre o ar interno e externo, em (°C);

t_e = temperatura do ar externo, em (°C);

Para a determinação da vazão de ar nas aberturas de entrada, por efeito do vento:

Considerando o coeficiente de descarga das aberturas $k = 0,61$, têm-se:

$$Q_{e,v} = K.V.A.\sqrt{cpe_e - cpe_s} = 0,61.V.A\sqrt{cpe_e - cpe_s}. \quad (3.81)$$

Considerando o incremento de vazão devido às aberturas de entrada serem diferentes das aberturas de saída de ar na equação acima, têm-se:

$$Q_{e,v} = 0,61.V\sqrt{cpe_e - cpe_s}\sqrt{\frac{A_e^2.A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}}. \quad (3.82)$$

onde:

V = velocidade do vento não perturbado na cota de referência, em (m/s);

A_e = área das aberturas de entrada de ar, considerando isoladamente o efeito do vento, em (m²);

A_s = área das aberturas de saída de ar, considerando isoladamente o efeito do vento, em (m²);

cpe_e = coeficiente de pressão ponderado nas aberturas de entrada de ar, considerando isoladamente o efeito do vento;

cpe_s = coeficiente de pressão ponderado nas aberturas de saída de ar, considerando isoladamente o efeito do vento.

Para a determinação da vazão total de ar nas aberturas de entrada, por efeito chaminé e efeito do vento:

$$Q_{e,T} = Q_{e,c} \sqrt{1 + \left(\frac{Q_{e,v}}{Q_{e,c}} \right)^2} \quad (3.83)$$

Observar que na aplicação das equações (3.80) e (3.82), a definição das aberturas de entrada e saída de ar deve ser feita considerando isoladamente cada efeito.

Para determinar a área necessária das aberturas de entrada ou saída de ar, supostas iguais, considerando o efeito chaminé isoladamente, apresenta-se a seguinte equação:

$$A = \frac{Q_e}{1,91 \sqrt{h \cdot \frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)}}} \quad (3.84)$$

com Q_e calculada pela equação:

$$Q_e = \frac{q_T}{\rho_e \cdot C_p \cdot \Delta t} = \frac{q_T}{1,20 \cdot 0,24 \cdot \Delta t} = \frac{q_T}{0,29 \cdot \Delta t_{avg}} \quad (3.85)$$

onde:

q_T = carga térmica em (kcal/h);

ρ_e = massa específica do ar externo, (kg/m^3);

C_p = calor específico do ar = 0,24 kcal/kg $^\circ\text{C}$;

Δt_{avg} = diferença de temperatura entre o ar interno e externo, em ($^\circ\text{C}$).

3.9 Aplicação dos modelos aproximados

Os modelos aproximados, apresentados nos itens anteriores, serão empregados para projetar o sistema de ventilação natural de um pavilhão industrial.

O galpão industrial em questão será localizado na cidade de Passo Fundo – Rio Grande do Sul, Brasil, e será empregado como fábrica para injeção de alumínio em carcaças e rotores elétricos. As dimensões do pavilhão são:

- largura: 50 metros;
- comprimento: 100 metros;
- pé-direito livre (desnível entre o piso e a face inferior da viga de cobertura) : 8 metros.

Nas Figuras 12, 13, 14, 15 são apresentadas vistas e um corte transversal do pavilhão a ser analisado, sendo as dimensões representadas em milímetros (mm).

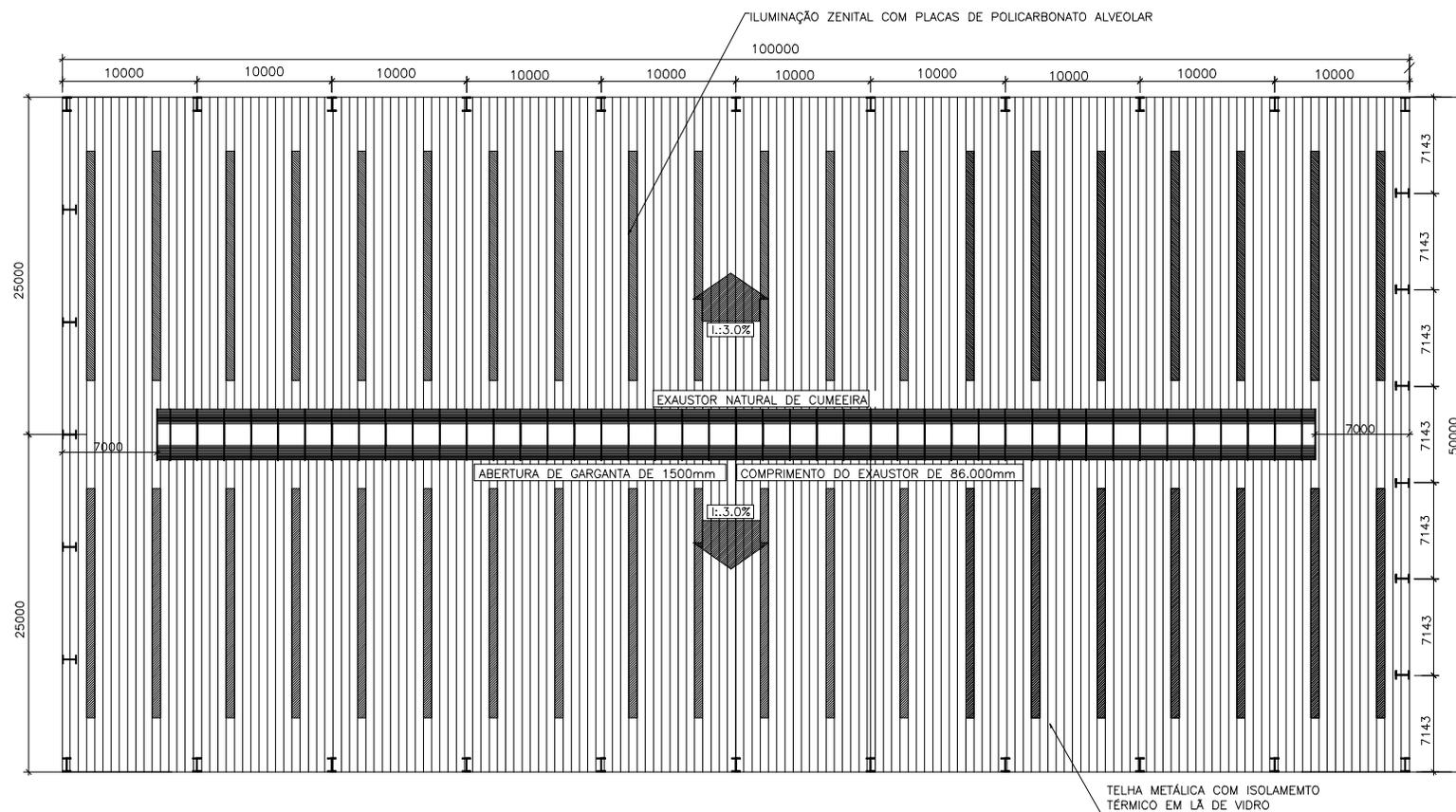


Figura 12: Vista superior do galpão industrial.

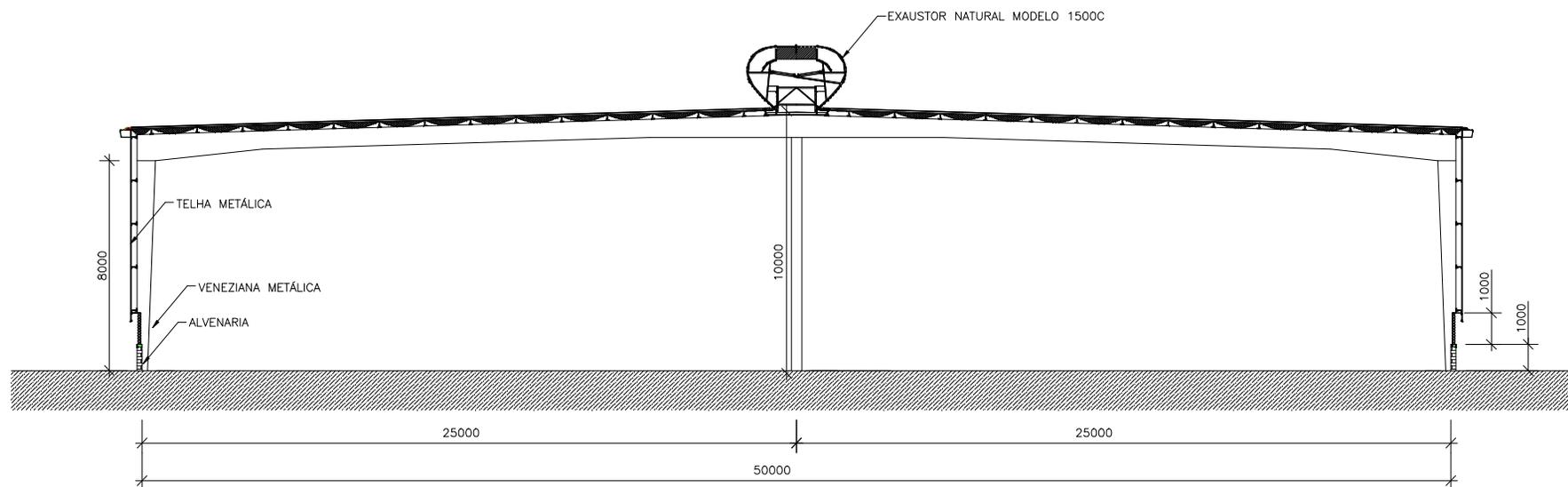


Figura 13: Corte Transversal do galpão industrial.

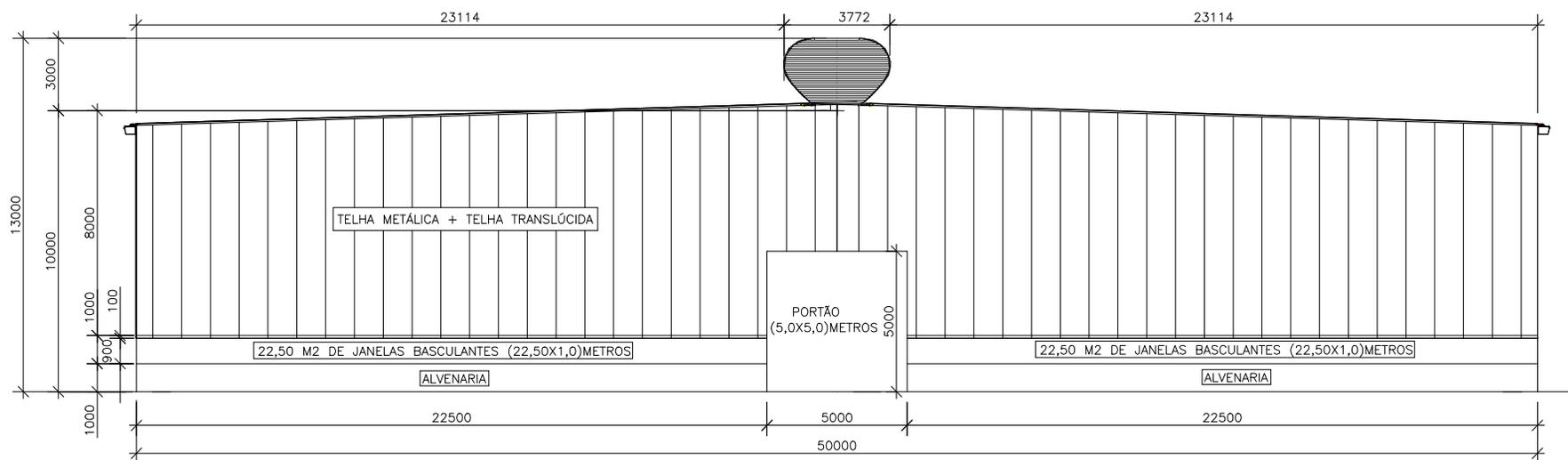


Figura 14: Fachada dos oitões do galpão industrial.

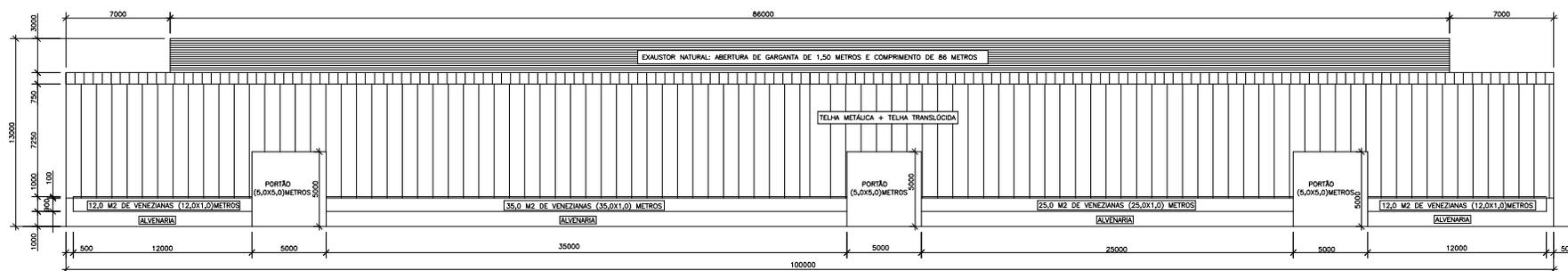


Figura 15: Fachada das laterais do galpão industrial.

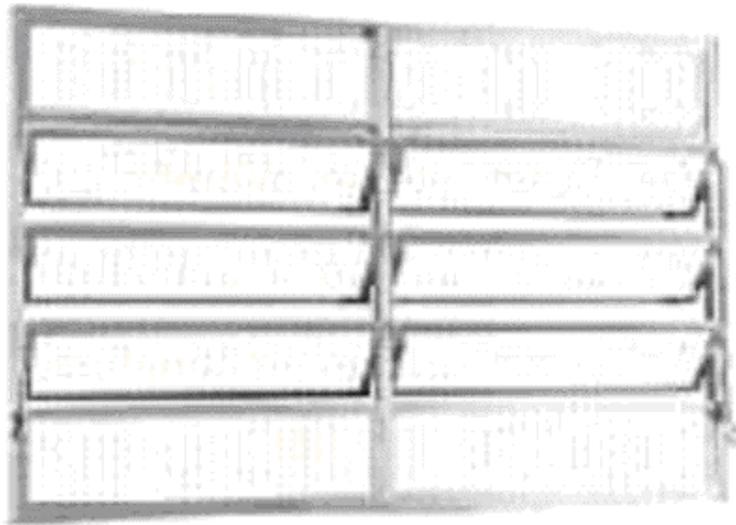
As aberturas de entrada de ar estão previstas com venezianas industriais, localizadas nas laterais, e janelas basculantes, dispostas nos oitões da edificação, conforme Figuras 16 e 17 respectivamente. Quanto às aberturas de saída de ar está prevista a colocação de um exaustor natural de cumeeira, conforme Figura 18.

Obs.: As Figuras 16, 17 e 18 que representam aberturas de entrada e saída de ar, são somente ilustrativas.



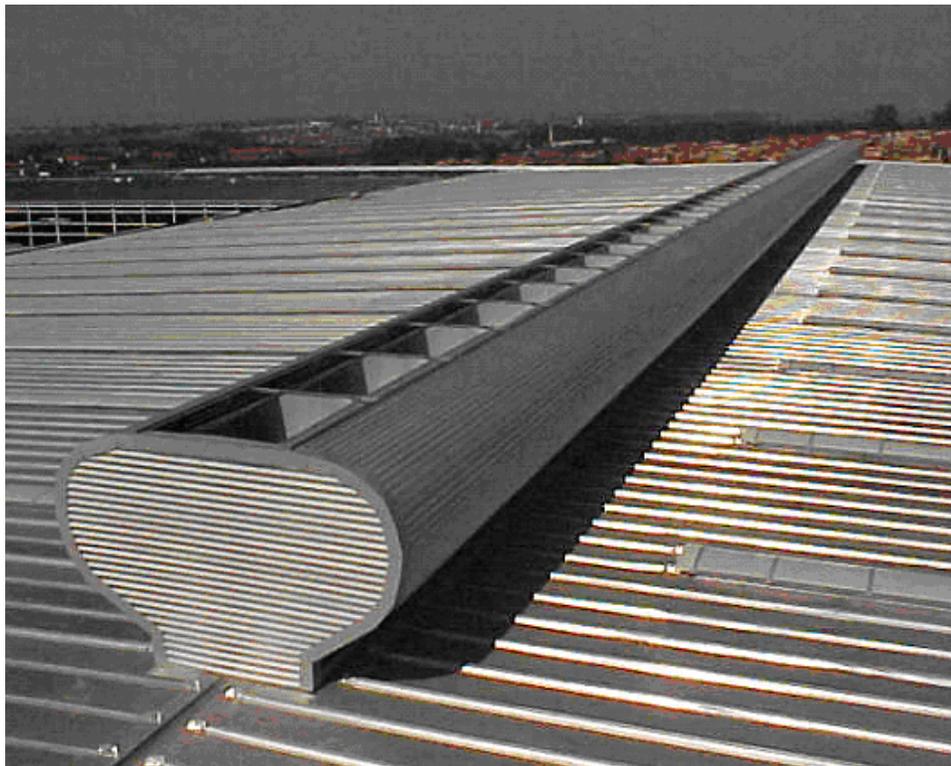
Fonte: Arquivo de fotos da Empresa Medabil Varco Pruden S.A., referente à obra “Borrachas Tipler”

Figura 16: Venezianas industriais para ingresso do ar externo.



Fonte: www.jap.com.br/basculantes.htm

Figura 17: Janelas basculantes para entrada do ar externo.



Fonte: Arquivo de fotos da Empresa Medabil Varco Pruden SA referente à obra "Borrachas Tipler"

Figura 18: Exaustor natural de cumeeira para saída do ar quente.

Para a aplicação dos modelos teóricos foram consideradas as seguintes hipóteses:

a) Considerou-se como admissível um Δt (diferença entre a temperatura do ar que sai e do ar que entra no edifício) de 10 °C. Esse valor foi adotado considerando que os experimentos efetuados em modelos, e medições *in situ*, indicam que a temperatura na zona de trabalho do pavilhão não ultrapassará em 5 °C a temperatura do ar externo (exigência das Normas da Antiga União Soviética para pavilhões destinados a processos industriais com grande geração de calor), se Δt for menor que 10 a 12 °C (BATURIN, 1976).

b) No caso dos modelos que empregam Δt_{avg} (diferença entre a temperatura média do ar interno e a temperatura do ar externo), foi considerado que $\Delta t_{avg} = \Delta t$. Essa aproximação é razoável, já que na etapa de projeto do sistema de ventilação é impossível determinar Δt_{avg} , a partir do valor de Δt considerado como admissível.

c) Como temperatura do ar externo t_e , foi adotado o valor 21,5 °C. Esse valor foi obtido como a média das temperaturas dos quatro meses mais quentes do ano em Passo Fundo (dezembro, janeiro, fevereiro e março) correspondentes ao período de 1961 a 1990 (EMBRAPA, 2004).

A vazão de ar necessária, para manter Δt em 10°C, empregando a equação (2.1), resultou igual 147,12 m³/s. Esse valor foi obtido considerando que:

- q_T = carga térmica total no pavilhão= 1.525.327,05 kcal/h (conforme cálculo em anexo A);
- ρ_e = massa específica do ar externo = 1,20 kg/m³
- C_p = calor específico do ar a pressão constante = 0,24 kcal/kg°C

Considerando que o volume do pavilhão é 48125 m³, a vazão indicada anteriormente conduz a um número de trocas de ar por hora de 11 vezes.

e) A massa específica do ar interno resultou igual a 1,16 kg/m³. Tanto a densidade do ar interno como a do ar externo, foram calculadas com a expressão a seguir:

$$\rho_{ar} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (3.86)$$

onde:

ρ_{ar} = densidade do ar, à temperatura absoluta T e pressão p , em (kg/m³);

ρ_0 = densidade do ar em condições normais de pressão (p_0) e temperatura (T_0) = 1,2249g/m³;

T_0 = 288,2 K.

f) A altura h = 8,25m, a ser considerada inicialmente na aplicação dos métodos, foi obtida como o desnível entre os centros das aberturas de entrada (venezianas com altura de

1,50 m, localizadas a 1 m acima do nível do piso acabado) e a saída de ar (exaustor natural, disposto na cumeeira), conforme é mostrado na Figura 19.

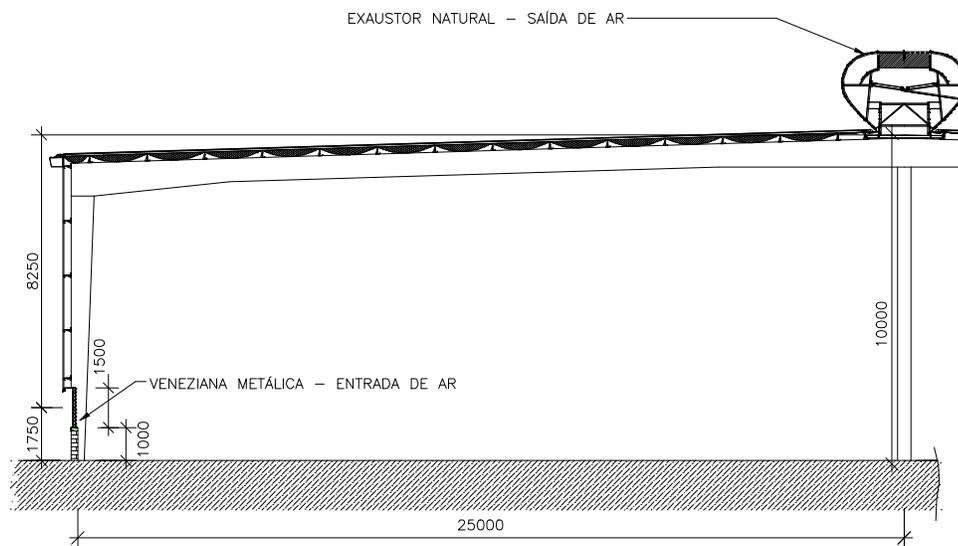


Figura 19: Definição da altura h .

g) Para a determinação da vazão de ar pelo efeito do vento, foi considerado o critério sugerido por Macintyre (1990) e Mesquita e Guimarães (1988), segundo os quais os cálculos de vazão de ar devem ser feitos considerando uma velocidade do vento igual a um 50% da velocidade média sazonal. Essa velocidade média igual a 4m/s foi obtida dos registros da Embrapa Trigo-Passo Fundo, correspondentes aos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, durante o período 1977 a 1994 (EMBRAPA, 2004).

h) Os coeficientes de pressão para paredes e cobertura das diferentes zonas do galpão industrial, considerados nos cálculos (Figura 20 e Figura 21), foram os sugeridos pela NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações, para vento à 90°, agindo perpendicularmente às fachadas principais (comprimento de 100 m) e para vento à 0°, agindo perpendicularmente às fachadas dos oitões (comprimento de 50 metros), respectivamente.

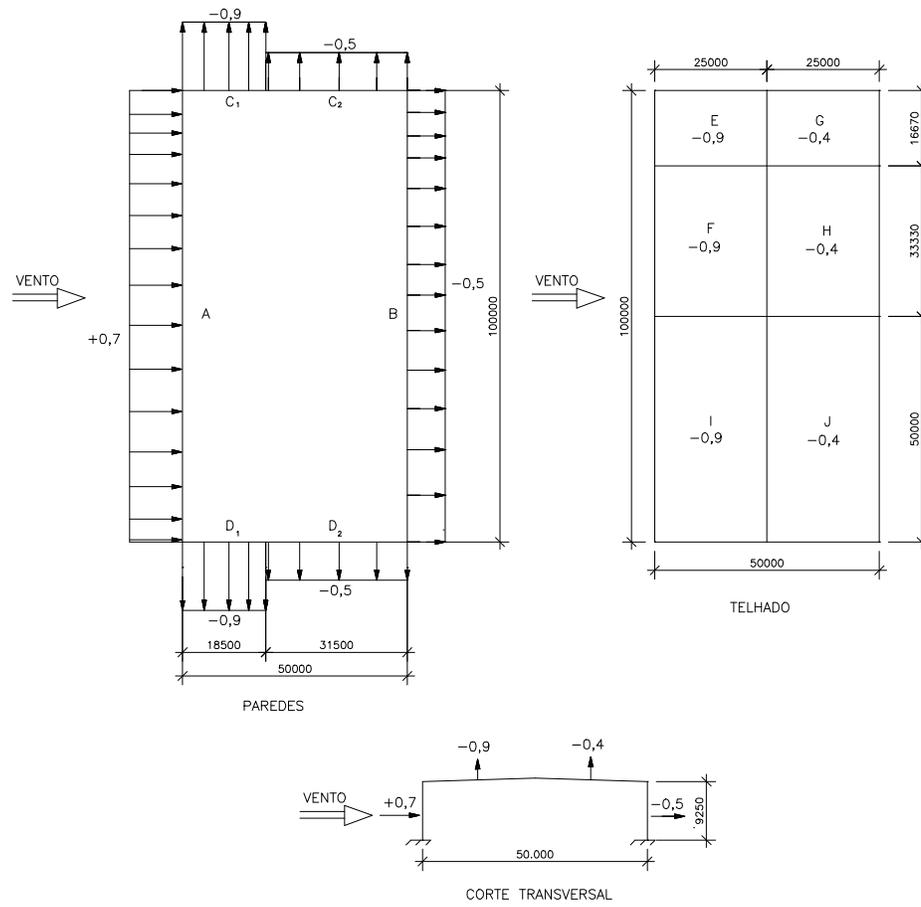


Figura 20: Coeficientes de pressão externa das paredes e telhado para vento à 90°.

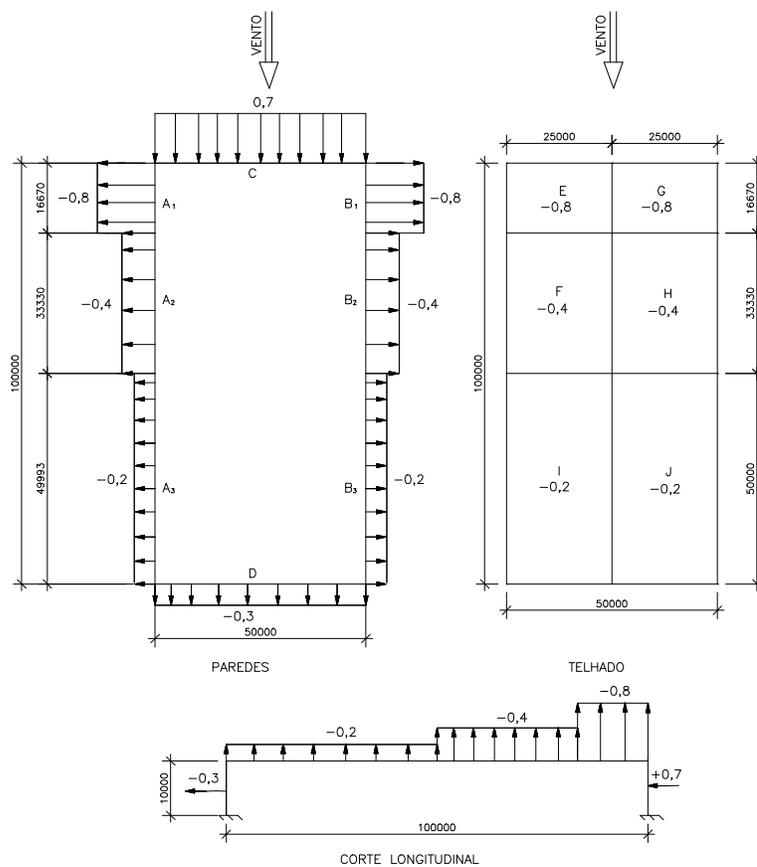


Figura 21: Coeficientes de pressão externa das paredes e telhado para vento à 0°.

i) No cálculo da ventilação as janelas basculantes e as venezianas foram consideradas abertas, porém os portões foram considerados fechados.

Na Tabela 4 são apresentadas as áreas necessárias das aberturas de entrada ou saída, consideradas iguais, obtidas aplicando os métodos teóricos aproximados, considerando unicamente o efeito chaminé.

Tabela 4 – Área necessária das aberturas de entrada ou saída de ar considerando o efeito chaminé.

MODELO	ÁREAS DE ENTRADA OU DE SAÍDA (m ²)
Randall e Canover (1931)	140,11
C.S.T.B. (1958)	90,26
ASHRAE (1967 e 1968)	140,11
A.I.S.I. (1965)	104,46
Constance (1966) – equação (3.47)	140,11
Constance (1966)– equação (3.48)	128,60
Toledo (1967 e 1999)	140,11
Van Straaten (1967)	163,97
Fan Engineering (1970)	131,18
Baturin (1976)	140,11
Daly (1978)	135,10
Cruz da Costa (1982)	100,79
Frota (1989)	116,76
Clezar e Nogueira (1999)	150,50
Fórmula proposta neste trabalho	145,66
Média	131,19 m ²
Coefficiente de variação	15,2%

Adotando o valor médio 131,19m², como a área necessária das aberturas de entrada ou de saída de ar, foram definidas as aberturas para o projeto executivo do sistema de ventilação do galpão, procurando distribuir as mesmas nas quatro fachadas da edificação:

1) Aberturas para entradas de ar:

- Laterais de 100 metros: 42,0 m² de área de passagem de ar (área livre das aberturas) para cada lateral, totalizando 84 m², através de 168 m² de venezianas industriais (com 50% de área livre), de 1m de altura, localizadas a 1,0m do nível do piso acabado;
- Oitões de 50 metros: 22,50 m² de área de passagem de ar (área livre das aberturas) para cada oitão, totalizando 45,00m², através de 90 m² de janelas basculantes (com 50% de área livre), de 1m de altura, localizadas a 1,0m acima do nível do piso acabado.
- Área total das aberturas de entrada de ar igual a 129m² (área livre).

2) Aberturas para saída de ar:

- Exaustor natural de cumeeira, com abertura de garganta e 1,50 m e comprimento de 86 m, totalizando uma área de passagem de ar (área livre da abertura) de 129 m².

Na Tabela 5 são apresentadas as vazões de ar, por efeito chaminé, obtidas aplicando os métodos teóricos aproximados. Esses cálculos foram feitos considerando a distribuição de área das aberturas do projeto executivo ($A_e = A_s = 129\text{m}^2$), e com um $h = 8,5\text{m}$, resultante da nova altura das aberturas de entrada de ar. Para comparação dos resultados das áreas de abertura de entrada e saída de ar e das vazões entre os diversos modelos, os resultados foram todos transformados para um único sistema de unidades: Sistema internacional de Unidades - SI.

Tabela 5 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé (Q_{ch}).

MODELO	VAZÕES DE AR DE ENTRADA OU SAÍDA DE AR Q_{ch} (m^3/s)
Randall e Canover (1931)	137,96
C.S.T.B. (1958)	214,08
ASHRAE (1967 e 1968)	137,96
A.I.S.I (1965)	184,41
Constance (1966) – equação (3.48)	137,96
Constance (1966)– equação (3.47)	138,04
Toledo (1967 e 1999)	137,96
Van Straaten (1967)	117,48
Fan Engineering (1970)	146,85
Baturin (1976)	137,96
Daly (1978)	143,05
Ênio Cruz da Costa (1982)	190,92
Frota (1989)	165,32
Clezar e Nogueira (1999)	127,96 (entrada) 132,12 (saída)
Fórmula proposta neste trabalho	132,37
Média	150,16 m^3/s
Coefficiente de variação	17,7%

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as vazões de ar por efeito dos ventos, para um ângulo de incidência de 90^0 e 0^0 , respectivamente, obtidas aplicando os métodos teóricos que consideram este efeito.

Tabela 6 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento a 90° (Q_v).

MODELO	VAZÕES DE ENTRADA OU SAÍDA DE AR Q_v (m ³ /s)	$\frac{Q_v}{Q_{ch}}$
ASHRAE (1967 e 1968)	50,41	0,365
Frota e Schiffer (2000)	53,61	0,324
Fórmula proposta neste trabalho	54,42	0,411
Clezar e Nogueira (1999)	68,49 (entrada) / 68,25 (saída)	0,526
NBR 6123 (1988)	68,29 (entrada) / 68,43 (saída)	-
Média	59,03 m ³ /s	-
Coeficiente de variação	14,65 %	-

Tabela 7 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento a 0° (Q_v).

MODELO	VAZÕES DE ENTRADA OU SAÍDA DE AR Q_v (m ³ /s)	$\frac{Q_v}{Q_{ch}}$
ASHRAE (1967 e 1968)	27,00	0,196
Frota e Schiffer (2000)	27,65	0,167
Fórmula proposta neste trabalho	28,22	0,213
Clezar e Nogueira (1999)	60,84 (entrada) – 60,84 (saída)	0,468
NBR 6123 (1988)	61,55 (entrada) – 61,55 (saída)	-
Média	41,05 m ³ /s	-
Coeficiente de variação	44,80 %	-

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentadas as vazões de entrada (vazões positivas) e de saída (vazões negativas), por efeito dos ventos, nas aberturas localizadas nos diferentes setores da envoltória do pavilhão industrial (Fig. 20 e 21). Essas vazões foram calculadas com os procedimentos de Clezar e Nogueira e da Norma NBR 6123.

Tabela 8 – Vazões de entrada e saída de ar nas aberturas do pavilhão, para vento a 90° (Q_v).

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 20)	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA (m ³ /s)	
	NBR 6123	CLEZAR E NOGUEIRA
A	55,74	55,75
B	7,64	7,77
C ₁ , D ₁	-13,26	-13,25
C ₂ , D ₂	4,91	4,99
E, F, I, G, H, J	-55,17	-55,00
Vazão total de entrada de ar	68,29	68,49
Vazão total de saída de ar	-68,43	-68,25

Tabela 9 – Vazões de entrada e saída de ar nas aberturas do pavilhão, para vento a 0^0 (Q_v).

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 21)	VAZÃO DE CADA ABERTURA (m^3/s)	
	NBR 6123	CLEZAR E NOGUEIRA
C	26,70	26,66
D	-4,00	-4,27
A ₁ , B ₁	-10,40	-10,43
A ₂ , B ₂	-13,62	-13,79
A ₃ , B ₃	13,24	12,98
E, G	-12,57	-12,60
F, H	-20,96	-19,75
I, J	21,61	21,20
Vazão total de entrada de ar	61,55	60,84
Vazão total de saída de ar	-61,55	-60,84

Finalmente, nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as vazões de ar obtidas aplicando os métodos aproximados, que consideram simultaneamente o efeito chaminé e do vento. Esses cálculos foram realizados a partir do projeto executivo das aberturas.

Tabela 10 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento a 90^0 .

MODELO	VAZÕES DE AR TOTAL (m^3/s)	VAZÃO TOTAL / VAZÃO POR EFEITO CHAMINÉ
ASHRAE (1967 e 1968)	146,88	1,06
Frota e Schiffer (2000)	173,80	1,05
Fórmula proposta neste trabalho	143,12	1,08
Clezar e Nogueira (1999)	144,68 (entrada) – 149,61 (saída)	1,13
Média	152,74 m^3/s	
Coeficiente de variação	9,27 %	

Tabela 11 – Vazões de entrada e saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento a 0^0 .

MODELO	VAZÕES DE AR TOTAL (m^3/s)	VAZÃO TOTAL / VAZÃO POR EFEITO CHAMINÉ
ASHRAE (1967 e 1968)	140,58	1,02
Frota e Schiffer (2000)	167,62	1,01
Fórmula proposta neste trabalho	135,34	1,04
Clezar e Nogueira (1999)	133,03 (entrada) – 137,44 (saída)	1,02
Média	144,70 m^3/s	
Coeficiente de variação	10,70 %	

Nas Figuras 22 e 23 são apresentadas as vazões totais, ou seja, considerando o efeito chaminé e do vento, para diferentes magnitudes (de 0 a 7,0 m/s) e direções (a 90^0 e 0^0) do

vetor velocidade média do vento, empregando diferentes modelos. Observar que os resultados anteriormente apresentados neste capítulo foram obtidos com uma velocidade média do vento de 2m/s.

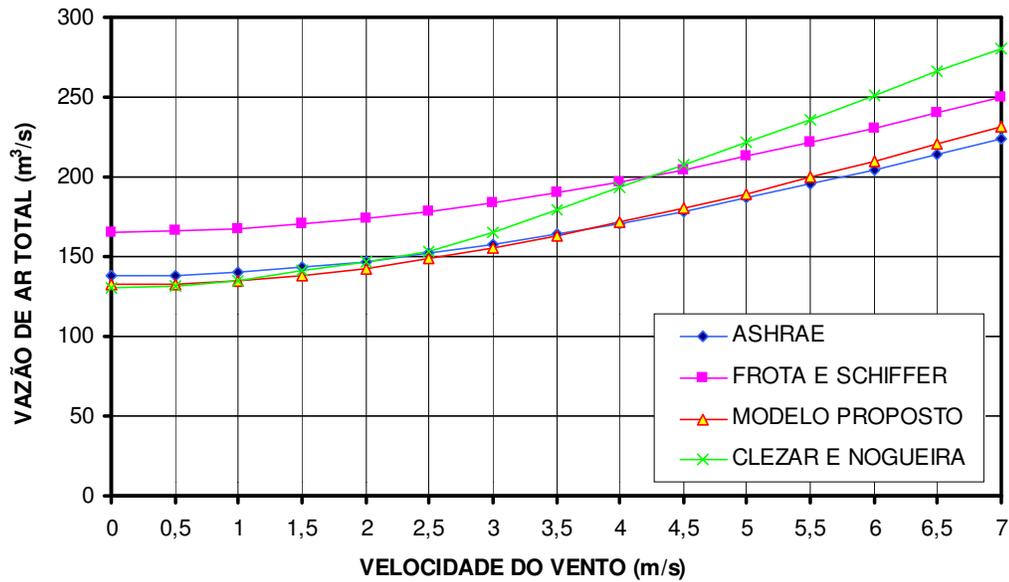


Figura 22: Vazões de ar considerando o efeito chaminé e ação do vento a 90°, para diferentes magnitudes do vetor velocidade média do vento.

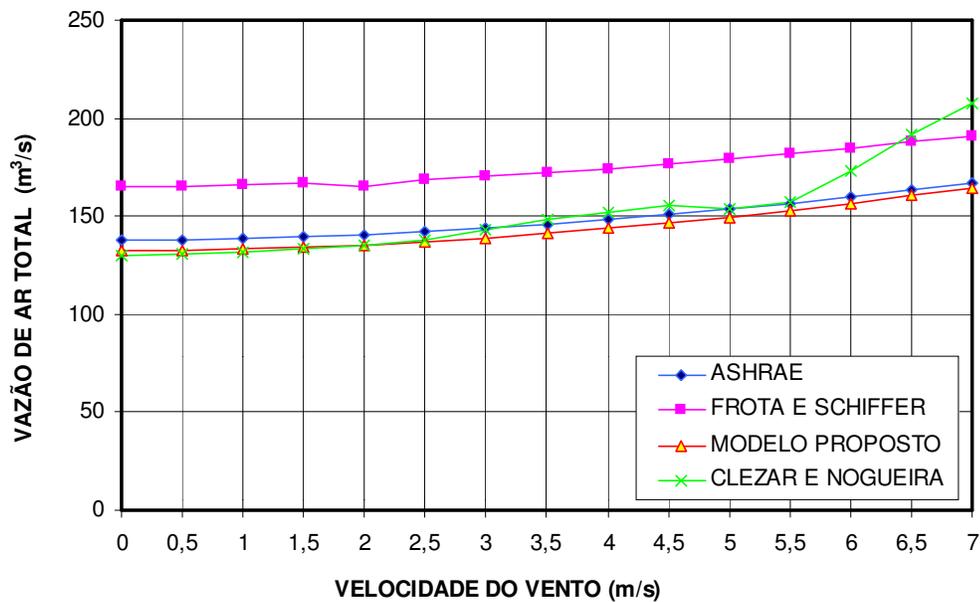


Figura 23: Vazões de ar considerando o efeito chaminé e ação do vento a 0°, para diferentes magnitudes do vetor velocidade média do vento.

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentadas as vazões totais (efeito chaminé e do vento) de entrada (vazões positivas) e de saída do ar (vazões negativas) nas aberturas localizadas nos diferentes setores do pavilhão industrial, para diferentes direções (a 90° e 0°) e magnitudes (de 0 até 7,0 m/s) do vetor velocidade média do vento. Essas vazões foram calculadas com o procedimento de Clezar e Nogueira (1999).

Tabela 12 – Vazões considerando o efeito chaminé e ação do vento a 90°, nas diferentes aberturas, para magnitudes do vento variável.

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	VAZÃO NAS ABERTURAS (m ³ /s) (vide Figura 20)					Q _e (m ³ /s)	Q _s (m ³ /s)
	PAREDES				TELHADO		
	A	B	C ₁ , D ₁	C ₂ , D ₂	E,F,I,G,H,J		
0,0	41,66	41,66	17,86	26,78	-132,12	127,96	-132,12
0,5	42,52	40,21	16,89	25,85	-137,37	125,47	-137,37
1,0	49,41	40,98	16,18	26,35	-137,60	132,97	-137,60
1,5	57,85	40,40	13,94	25,97	-143,48	138,16	-143,48
2,0	68,26	40,15	10,46	25,81	-149,60	144,68	-149,61
2,5	80,07	40,59	3,33	26,10	-155,40	150,09	-155,40
3,0	93,05	42,42	-9,62	27,27	-158,75	162,74	-168,37
3,5	105,73	42,95	-15,52	27,62	-166,84	176,30	-182,35
4,0	118,62	43,34	-20,38	27,86	-176,04	189,93	-196,42
4,5	131,71	43,77	-24,77	28,14	-185,88	203,62	-210,58
5,0	144,95	44,50	-28,89	28,45	196,28	217,90	-225,17
5,5	158,35	44,90	-32,83	28,87	-207,04	232,12	-239,87
6,0	171,84	45,72	-36,62	29,39	-217,86	246,95	-254,48
6,5	185,30	46,24	-40,40	29,72	-229,92	261,26	-270,33
7,0	199,12	48,03	-43,89	30,88	-239,64	278,03	-283,53

Tabela 13 – Vazões considerando o efeito chaminé e ação do vento a 0^0 , nas diferentes aberturas, para magnitudes do vento variável.

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	VAZÃO DAS ABERTURAS (m ³ /s) (vide Figura 21)								Q _e (m ³ /s)	Q _s (m ³ /s)
	PAREDES					TELHADO				
	C	D	A ₁ B ₁	A ₂ B ₂	A ₃ B ₃	E,G	F,H	I,J		
0,0	22,32	22,32	11,90	32,24	39,18	-14,85	-51,21	-66,06	127,96	-132,12
0,5	23,25	22,35	11,59	31,99	39,24	-15,22	-51,59	-65,96	128,32	-132,77
1,0	25,94	22,15	10,66	31,40	39,60	-16,24	-52,56	-65,48	129,74	-134,28
1,5	29,91	22,01	8,92	30,42	40,24	-17,75	-53,95	-64,39	131,50	136,09
2,0	34,79	21,94	5,77	29,20	41,33	-19,60	-55,50	-62,34	133,03	-137,44
2,5	40,55	22,46	-4,35	28,57	43,68	-21,50	-56,29	-57,76	135,26	-139,90
3,0	46,32	22,49	-9,62	26,70	45,43	-23,87	-58,49	-53,90	140,94	-145,88
3,5	52,27	22,36	-13,46	24,01	47,22	-26,46	-61,34	-49,64	145,87	-150,90
4,0	58,35	22,11	-16,89	20,28	49,04	-29,17	-64,50	-43,58	149,78	-154,14
4,5	64,56	21,84	-20,06	15	51,06	-31,99	-68,01	-37,70	152,45	-157,76
5,0	70,88	21,66	-23,07	5,28	53,38	-34,81	-71,41	-27,18	151,20	-156,47
5,5	77,28	21,32	-26,02	-14,37	55,71	-37,74	-75,21	-6,23	154,61	-159,57
6,0	83,27	19,25	-29,96	-24,76	56,29	-41,05	-81,40	11,72	170,53	-176,47
6,5	89,50	17,61	-32,28	-31,50	57,70	-44,23	-86,75	23,47	188,27	-194,75
7,0	95,82	15,87	-35,21	-37,19	59,40	-47,38	-91,88	33,10	204,19	211,66

3.10 Análise dos resultados

A partir da consideração de duas situações muito particulares, edificação com somente duas aberturas, de áreas iguais, ou não, mas com iguais coeficientes de descarga, neste capítulo, foram deduzidas expressões para a determinação da vazão de ar por efeito chaminé, por efeito dos ventos e por ambos efeitos simultaneamente. Também foi deduzida uma equação para o cálculo da área necessária das aberturas de entrada ou saída de ar, supostas iguais, considerando o efeito chaminé isoladamente.

Da comparação das vazões (Tabelas 5, 6, 7, 10 e 11 e Figuras 22 e 23) e áreas das aberturas (Tabela 4) calculadas com os diferentes métodos teóricos versus os obtidos com a metodologia de Clezar e Nogueira, considerada como a mais precisa dentre os modelos analisados, pode-se afirmar que as equações sugeridas neste trabalho são tão confiáveis quanto as sugeridas por outros autores.

Dentre os modelos analisados sugere-se o emprego da metodologia de Clezar e Nogueira, deduzida com hipóteses menos restritivas, ou então, as equações sugeridas neste trabalho, que a diferença do modelo anterior, permitem a obtenção das vazões sem iterações. Mais ainda, as equações propostas neste trabalho não precisam do emprego de figuras no processo de cálculo, como outros métodos analisados.

Os coeficientes de variação menores a 18 %, resultantes da aplicação dos modelos analisados (Tabelas 4, 5, 6, 10 e 11) são aceitáveis, ou seja, os modelos teóricos apresentam uma dispersão de resultados compatível com o bom exercício da engenharia.

A situação indicada anteriormente, ou seja, os modelos apresentam uma dispersão de resultados aceitáveis, não se verificou quando os mesmos foram empregados para a determinação da vazão de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento a 0^0 (Tabela 7). Isto se deve, provavelmente, ao fato de que os modelos teóricos, com exceção das metodologias propostas pela NBR 6123 (1988) e por Clezar e Nogueira, consideram que as aberturas de entrada e saída de ar devem estar necessariamente localizadas na zona a barlavento e sotavento da edificação, respectivamente. Essa hipótese, um tanto razoável, nem sempre se verifica, como pode ser observado nas Tabelas 8 e 9.

A vazão de entrada ou saída de ar considerando unicamente o efeito do vento é da ordem de 50% da vazão de entrada ou saída de ar considerando unicamente o efeito chaminé (Tabela 6 e 7). Entretanto, quando agem simultaneamente, os efeitos chaminé e do vento (para uma velocidade média do vento de 2,0 m/s), a contribuição da ação do vento na vazão total de ventilação é pequena, já que a relação vazão total / vazão por efeito chaminé, agindo isoladamente, não ultrapassa o valor 1,13 (Tabelas 10 e 11).

Os métodos da norma NBR 6123 (1988) e de Clezar e Nogueira conduzem a valores de vazão (Tabelas 6, 7, 8 e 9) praticamente idênticos, pois ambos modelos são idênticos quando a temperatura externa do ar é igual à temperatura interna do fluido.

Como era de esperar a vazão de ar total (Figuras 22 e 23) aumenta com a velocidade do vento. Entretanto, a vazão de ar calculada com a metodologia de Clezar e Nogueira cresce mais rapidamente com a velocidade do vento que as calculadas com os outros modelos analisados (Figuras 22 e 23). Esse crescimento mais rápido da vazão se opera a partir de uma velocidade do vento de 2,5 m/s, para vento a 90^0 , e de 5,5 m/s, para vento a 0^0 . A situação indicada anteriormente se deve provavelmente à incapacidade dos modelos teóricos analisados, com exceção dos modelos da NBR 6123 (1988) e de Clezar e Nogueira, para estabelecer quais são as aberturas de ingresso e saída de ar.

Na Tabela 12 pode ser observado que para velocidades do vento (a 90^0) menores a 3,0 m/s, a distribuição das aberturas de entrada e saída do ar está condicionada pelo efeito chaminé, ou seja, as aberturas de entrada de ar estão localizadas nas paredes (aberturas inferiores) e as aberturas de saída de ar estão no telhado (aberturas superiores). Para velocidades do vento maiores ou iguais a 3,0 m/s a distribuição das aberturas de entrada e saída de ar está governada pelo efeito dos ventos (comparar sinais das vazões nas Tabelas 12 e 8).

Na Tabela 13 pode ser observado que para velocidades do vento (a 0^0) menores a 2,5 m/s, a distribuição das aberturas de entrada e saída de ar está definida pelo efeito chaminé. Para velocidades do vento maiores ou iguais a 6,0 m/s a distribuição das aberturas de entrada e saída de ar está governada pelo efeito dos ventos (comparar sinais das vazões nas Tabelas 13 e 9).

4 - ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

4.1 Introdução

O emprego de certos modelos teóricos aproximados, para a determinação da vazão de ventilação por efeito dos ventos, requer do conhecimento da distribuição dos coeficientes de pressão nas zonas onde serão localizadas as aberturas. Na melhor das situações, ou seja, quando não são empregados resultados disponíveis na literatura, obtidos de ensaios em túnel de vento sem simulação das propriedades do vento natural, os projetistas de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais fazem uso das recomendações existentes em normas de vento atualizadas, como por exemplo, a NBR-6123 (1988). Entretanto, os valores sugeridos pelas normas de vento correspondem normalmente a coeficientes de forma, ou seja, a médias espaciais dos coeficientes de pressão calculados sobre grandes superfícies. Mais ainda, os ensaios em túnel de vento que servem de base para estabelecer os coeficientes de norma foram obtidos sem os dispositivos de ventilação, como por exemplo, os exaustores naturais de cumeeira.

Do parágrafo anterior surge o segundo problema pesquisado nesta dissertação: *podem ser empregados os coeficientes de forma sugeridos pela NBR-6123 no projeto da ventilação natural de pavilhões industriais?*

Para tentar responder essa questão adotou-se a seguinte metodologia:

- Ensaiou-se um modelo em escala reduzida (1/200), do pavilhão industrial analisado no capítulo anterior, em túnel de vento. Assim, foi determinada a distribuição dos coeficientes de pressão onde seriam localizadas as aberturas do sistema de ventilação. Cabe assinalar que no modelo ensaiado foi reproduzido em escala o exaustor natural de cumeeira.

- Aplicaram-se os modelos teóricos com os coeficientes de pressão obtidos dos ensaios em túnel de vento e comparam-se os resultados com aqueles obtidos com os coeficientes de forma sugeridos pela NBR-6123 (1988).

4.2 Condições de semelhança

As forças estáticas devidas ao vento em uma edificação podem ser determinadas em modelo reduzido, desde que se tenha:

- Semelhança geométrica ou semelhança dos corpos;
- Semelhança cinemática ou semelhança dos escoamentos;
- Semelhança dinâmica ou semelhança das forças.

4.2.1 Semelhança geométrica

Esta condição exige que o modelo seja semelhante à edificação real em forma e em orientação no escoamento.

4.2.2 Semelhança cinemática

Esta semelhança inclui a mesma lei de distribuição de velocidades médias e as mesmas características da turbulência.

4.2.3 Semelhança dinâmica

Em ensaios com modelos e nas edificações reais a forma do escoamento nas vizinhanças do sólido depende essencialmente da localização da separação do escoamento de ar.

Em sólidos angulosos, a não ser para números de Reynolds muito baixos (em torno de 3000), que não interessam para edificações, a separação acontece em uma aresta, ficando o fluxo perfeitamente definido, independentemente do número de Reynolds. Ou seja, neste tipo de sólidos não é necessário verificar a condição $Re(\text{modelo}) = Re(\text{protótipo})$ para poder utilizar os coeficientes aerodinâmicos obtidos sobre modelos.

Em superfícies arredondadas, entretanto, essa separação depende principalmente do número de Reynolds da turbulência do escoamento e da rugosidade superficial do modelo.

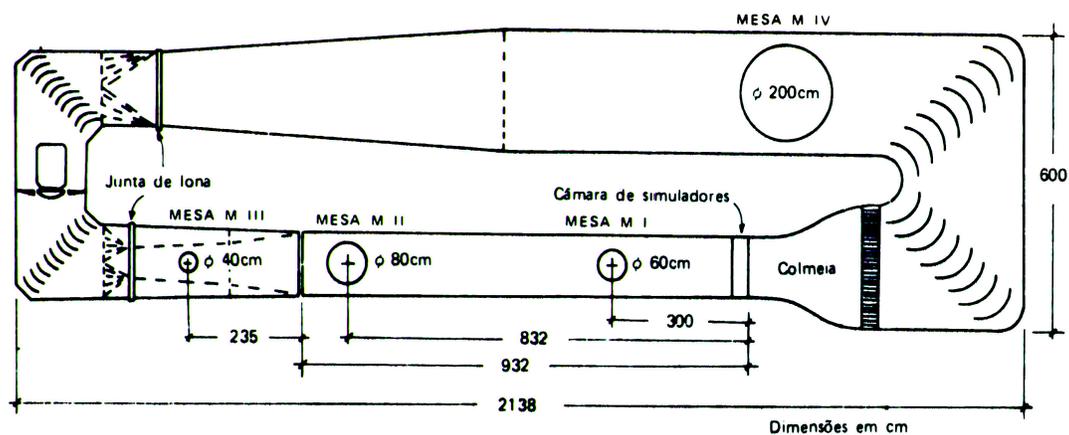
4.3 – Características do túnel de vento

Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, conforme apresentado na Figura 24.



Figura 24: Túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

O túnel de vento possui circuito fechado (tipo Prandtl) e câmara de ensaios fechada, tendo como características principais mostradas na Figura 25, e descritas a seguir:



Fonte: Blessmann, 1990, p.115

Figura 25: Circuito aerodinâmico do túnel de vento TV-2.

- Câmara de ensaio
Dimensões da seção transversal:
largura variável x altura: (1,20 a 1,30) x 0,90 m²;
comprimento : 9,32 metros;
relação comprimento/altura: 10,40.
- Velocidade máxima da corrente de ar, sem modelos e outras obstruções: 41,60 m/s (150 km/h);
- Potência do motor elétrico de 74,6 kW (100 cv).

4.4 – Modelo ensaiado

O modelo do pavilhão industrial analisado no capítulo anterior (Figura 26), construído em uma escala geométrica 1:200, possui as dimensões apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Características do protótipo e do modelo do pavilhão.

DIMENSÃO	PROTÓTIPO (m)	MODELO (m)
Largura (a)	50	0,25
Comprimento (b)	100	0,50
Pé-direito livre (h ₁)	8	0,04
Altura total – nível da cumeeira (h ₂)	10	0,05
Altura total – nível superior do lanternim (h _t)	13	0,065

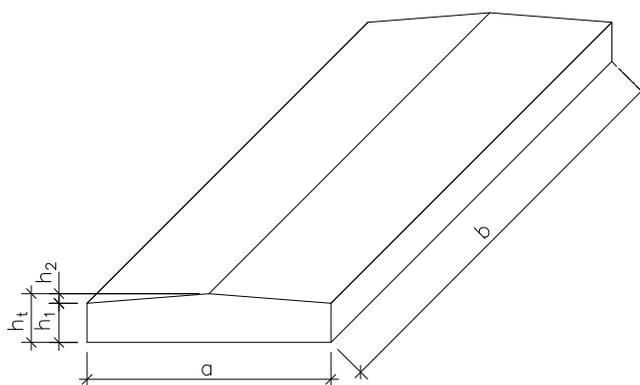


Figura 26: Características geométricas do pavilhão industrial ensaiado.

O modelo foi construído em madeira, conforme apresenta a Figura 27. As tomadas de pressão foram executadas com furos de 1,5 mm de diâmetro onde foram fixadas mangueiras plásticas de 1,0 mm de diâmetro interno e com cerca de 1,20m de comprimento. Através de conectores, essas mangueiras plásticas, foram ligadas a outras com 2mm de diâmetro interno e com mais ou menos 5 metros de comprimento, ligadas estas aos tubos de vidro de 5 mm de diâmetro interno de um multimanômetro a álcool. As mangueiras de 1,0 mm de diâmetro devem ter um comprimento de pelo menos 1,20 m para garantir que a mesma atue como amortecedor, isto é, como um filtro das frequências altas, de tal forma que os valores registrados no multimanômetro sejam pressões médias temporais. As mangueiras de plástico atuam como amortecedores em razão do fluxo laminar, que se estabelece dentro da mesma, como consequência de seu pequeno diâmetro.



Figura 27: Modelo do pavilhão em madeira.

As Figuras 28, 29 e 30, indicam a localização das tomadas de pressão no modelo ensaiado. Como foi instrumentado somente um quarto do modelo os ensaios foram executados para ângulos de incidência do vento entre 0° e 360° .

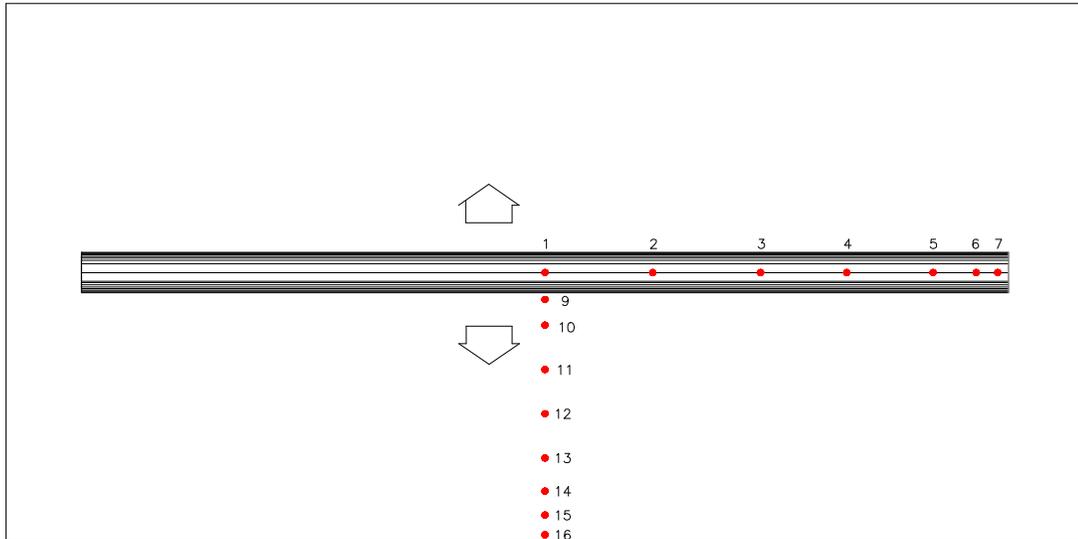


Figura 28: Tomadas de pressão no telhado.



Figura 29: Tomadas de pressão da parede lateral.

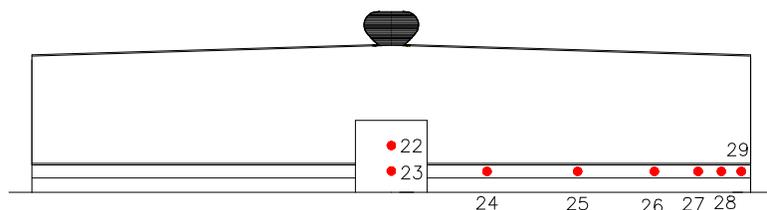


Figura 30: Tomadas de pressão na parede de oitão.

4.5 – Vento natural simulado

Para nos ajustarmos à condição de semelhança cinemática foram simulados dois tipos de vento, com perfil de velocidades médias horárias segundo uma curva de potência de expoente $p = 0,11$ e $p = 0,23$, correspondentes às categorias rugosidade superficial (tipo de terreno) I e IV da Norma NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações.

Para obter o tipo de vento com perfil de velocidades médias horárias segundo a curva de expoente $p = 0,11$ foram usados unicamente anteparos triangulares, como mostra a Figura 31, porém para simular o vento segundo a curva de expoente $p = 0,23$ foram usados anteparos triangulares perfurados, uma placa perfurada e blocos paralelepípedicos com 30 mm de altura e base de $20 \times 20 \text{ mm}^2$, conforme apresentado na Figura 32.



Figura 31: Características do túnel de vento para simulação do vento tipo $p = 0,11$.



Figura 32: Características do túnel de vento para simulação do vento tipo $p = 0,23$.

A Figura 33 mostra a principais características do vento simulado: perfil de velocidades médias horárias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do

túnel. Na Figura 34 apresentam-se as razões entre o desvio padrão das flutuações da velocidade do escoamento incidente e sua velocidade média: curvas de intensidade (I_1) e na Figura 35 são representadas as dimensões proporcionais ao comprimento médio dos maiores turbilhões presentes no escoamento incidente: macroescala (L_1), sendo ambos referidos à componente longitudinal de turbulência.

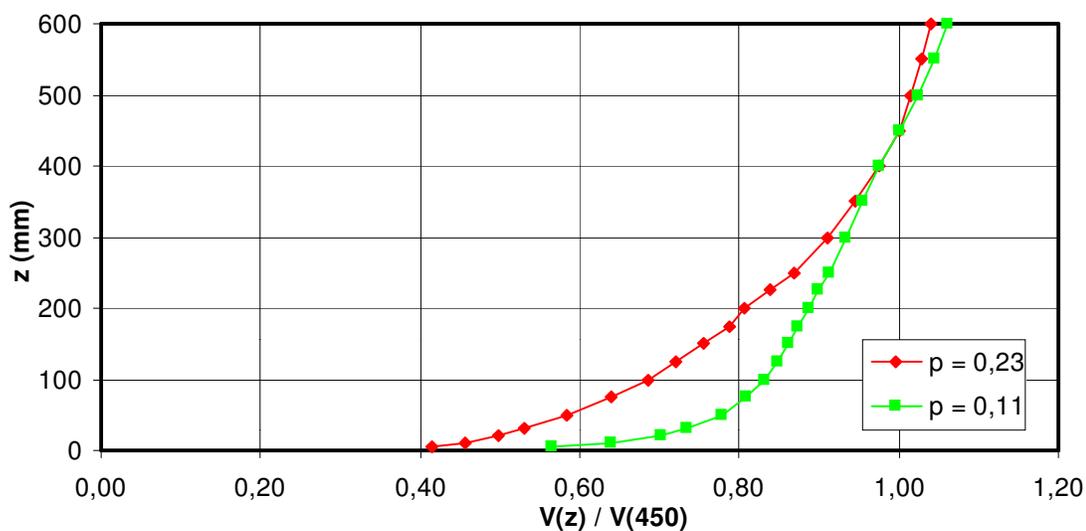


Figura 33: Perfil de velocidades médias horárias em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel para vento com $p = 0,11$ e $p = 0,23$

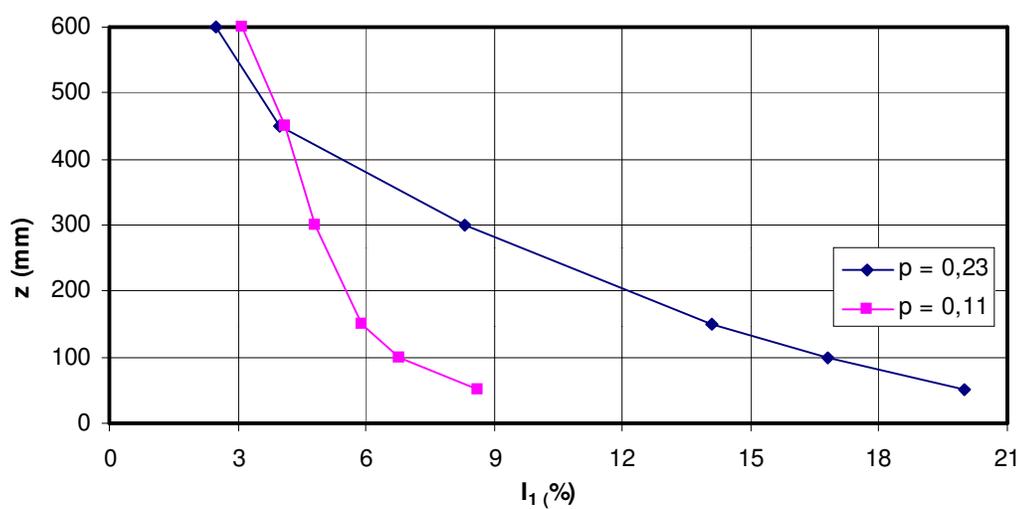


Figura 34: Intensidade (I_1) da componente longitudinal da turbulência.

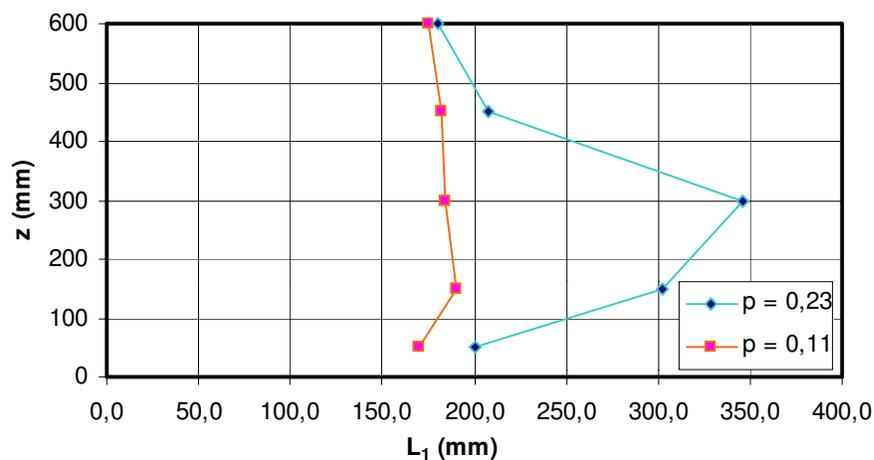


Figura 35: Macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência.

Os perfis das velocidades médias da Figura 33 são expressos por:

$$\frac{V_z}{V_{450}} = \left(\frac{Z}{450} \right)^p \quad (4.1)$$

onde:

V_z = velocidade média na altura z acima do piso do túnel;

V_{450} = velocidade média a uma altura de 450mm do piso;

$p = 0,23$ ou $p = 0,11$.

Na Tabela 15 estão os valores da macroescala (L_1) e da intensidade (I_1) da componente longitudinal da turbulência correspondente ao topo dos modelos ensaiados.

Tabela 15 – Valores da intensidade (I_1) e da macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência correspondente ao topo do modelo (lanternin).

INTENSIDADE I_1 (%)		MACROESCALA L_1 (mm)	
$p = 0,11$	$p = 0,23$	$p = 0,11$	$p = 0,23$
8,60	20	170	200

4.6 – Instrumentos utilizados durante os ensaios

4.6.1 – Manômetro

Para a determinação da pressão diferencial entre os anéis piezométricos, localizados no convergente, foi utilizado um micro-manômetro tipo Betz, com resolução de 0,1mm de coluna de água. Para determinar as pressões estáticas nas tomadas do modelo e para cada

ângulo de incidência do vento foi utilizado um multimanômetro a álcool constituído de 104 tubos de vidro de 7mm de diâmetro externo e 5mm de diâmetro interno, conectados pela parte inferior a um depósito contendo álcool tingido de azul.

4.6.2 – Termômetro

O termômetro elétrico foi utilizado durante os ensaios para a determinação da temperatura do ar na câmara de ensaios.

4.6.3 – Barômetro

Para determinação da pressão atmosférica durante os ensaios, foi utilizado um barômetro com resolução de 1mm de coluna de Hg.

Cabe lembrar que pressão e temperatura são os parâmetros que definem a massa específica do ar.

4.6.4 – Fotografias

Durante os ensaios para cada ângulo de incidência do vento, o multimanômetro foi fotografado como pode ser visto na Figura 36, sendo que posteriormente aos ensaios, através destas fotografias e com o auxílio de uma lupa e uma régua milimétrica, foram realizadas as leituras das pressões estáticas.

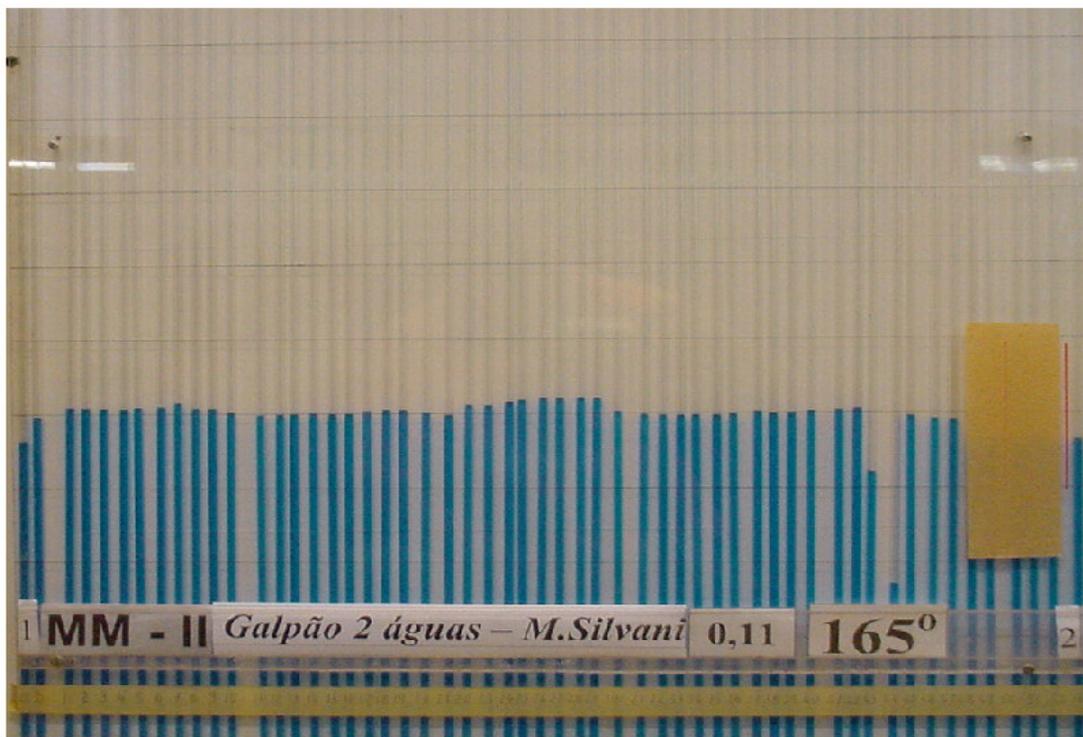


Figura 36: Exemplo de fotografia do multimanômetro de pressões.

4.7 – Procedimento experimental

4.7.1 – Descrição dos ensaios

Após a confecção do modelo, o mesmo foi fixado à mesa giratória, M-2, existente na câmara de ensaios, por meio de parafusos e na seqüência as tomadas dos modelos são ligadas ao multimanômetro, e verificando-se a desobstrução e estanqueidade de todas as mangueiras, conforme apresenta a Figura 37.



Figura 37: Verificação do esquema de ligações.

Com a verificação do esquema de ligação, o modelo foi ensaiado para os seguintes ângulos de incidência do vento: 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165°, 180°, 195°, 210°, 225°, 240°, 255°, 270°, 285°, 300°, 315°, 330°, 345°. Para cada ângulo de incidência do vento, obtido girando-se a mesa de ensaio, fotografou-se o multimanômetro para posteriormente serem lidas as pressões estáticas. Além disso, para cada ângulo era lido no micro-manômetro tipo Betz a pressão diferencial entre os anéis piezométricos e a temperatura do ar no interior da câmara. Quanto à pressão atmosférica, a mesma foi lida uma única vez no início dos ensaios.

4.7.2 - Pressão estática de referência (p_{ref})

O ponto escolhido como referência para cada modelo, ou seja, sobre o qual medem-se os parâmetros de referência (velocidade média, pressão estática e pressão dinâmica de referência) está localizado no eixo de simetria da seção principal da mesa de ensaio na altura em escala (50mm) correspondente a 10m.

Por outro lado, estes parâmetros devem ser medidos em condições de escoamento não perturbado pela presença do modelo. Entretanto, no momento do ensaio não é possível medir a pressão na altura em escala correspondente a 10 metros do modelo, definida como pressão

estática de referência, devido à presença do modelo, razão pela qual a pressão estática de referência foi medida num ponto a barlavento, localizado entre as mesas I e II, na parede lateral do túnel, conhecido como referência III.

4.7.3 – Pressão dinâmica (q_{ref}) e velocidade (V_{ref}) média do vento no ponto de referência

A pressão dinâmica no ponto de referência, em (N/m^2), é definida como:

$$q_{ref} = 0,5 \cdot \rho_{ar} \cdot V_{ref}^2 \quad (4.2)$$

onde:

ρ_{ar} = massa específica do ar (Kg/m^3);

V_{ref} = velocidade do escoamento no ponto de referência (m/s).

Igual à pressão estática, p_{ref} , a pressão dinâmica no ponto de referência, ou seja, na altura em escala correspondente a 10 metros do protótipo, não pode ser medida na ocasião dos ensaios.

Para a obtenção de q_{ref} , recorre-se a uma correlação estabelecida anteriormente, entre a magnitude da pressão $q(z)$ (pressão dinâmica no ponto de altura z) e o valor da pressão diferencial entre os anéis piezométricos (Δpa). Da correlação citada surge o parâmetro $k(z)$:

$$k(z) = \frac{q(z)}{\Delta pa} \quad (4.3)$$

A partir da definição de pressão dinâmica pode-se calcular a velocidade média do vento no ponto de referência, usando-se a expressão:

$$V_{ref} = \sqrt{2 \frac{q_{ref}}{\rho_{ar}}} \quad (4.4)$$

onde:

$q_{ref} = k_{(zref)} \Delta pa$ [N/m^2], sendo:

$k_{(zref)}$ = parâmetro obtido da correlação para a cota em escala correspondente a 10 metros do protótipo, Z_{ref} (adimensional);

Δpa = pressão diferencial registrada entre os anéis piezométricos durante os ensaios [N/m^2].

Por sua vez

$$\rho_{ar} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_e} \cdot \frac{p_e}{p_0} \quad (4.5)$$

onde:

ρ_0 = massa específica do ar em condições normais de pressão (p_0) e temperatura (T_0) = 1,2249 kg/m^3 ;

$T_0 = 15^\circ\text{C} = 288,2\text{ K}$;
 $p_0 = 760\text{ mm Hg} = 1013,25\text{ mm.c.a} = 101325\text{ Pa}$;
 p_e = pressão atmosférica no momento do ensaio (mm Hg);
 T_e = temperatura na câmara no momento do ensaio (K);
 $T_e = 273,2 + t$ ($^\circ\text{C}$).

ou

$$\rho_{ar} = 0,4645 \frac{P_e}{273,2 + t} \quad (4.6)$$

resulta,

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{2k_{(zref)} \Delta pa}{0,4645 \frac{pe}{273,2 + t}}} \quad (4.7)$$

Na Tabela 16 são apresentados os valores do parâmetro $k_{(zref)}$ correspondentes a uma altura de 0,05m no túnel (altura de 10 m no protótipo).

Tabela 16 - Coeficientes $k_{(zref)}$ do túnel de vento

VENTO	$k_{(z=0,05\text{ m})}$
p = 0,11	0,611
p = 0,23	0,407

Os valores de V_{ref} (valores médios para cada ensaio) estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Velocidades de referência (V_{ref}) e número de Reynolds (Re) durante os ensaios.

VENTO	COTA NO MODELO (mm)	PRESSÃO DIFERENCIAL ΔPa (N/m^2)	VELOCIDADE V_{ref} (m/s)	NÚMERO DE REYNOLDS ($\text{Re} \times 10^{-5}$)
p = 0,11	50	604,95	25,03	7,77
p = 0,23	50	589,27	20,15	6,34

4.7.4 – Número de Reynolds (Re)

O número de Reynolds (médio para cada ensaio) foi definido da seguinte maneira:

$$\text{Re} = \frac{V.L}{\nu} \quad (4.8)$$

onde:

$V = V_{\text{ref}}$ = velocidade média do vento no ponto de referência (m/s);

L = dimensão característica, adotada igual a 0,05m, que corresponde à altura em escala do topo da cumeeira do pavilhão;

ν = viscosidade cinemática do ar na temperatura média do ensaio (m²/s);

Para o cálculo de ν recorreremos à seguinte expressão:

$$\nu = (13 + 0,1.t)10^{-6} \quad (4.9)$$

onde:

t = temperatura média do ar na câmara na ocasião dos ensaios (°C).

Os números de Reynolds durante os ensaios estão indicados na Tabela 17.

4.7.5 – Correção do bloqueio

As condições do campo aerodinâmico em torno de um modelo ensaiado em túnel de vento são diferentes das existentes em torno da construção real, na atmosfera livre, em que o escoamento de ar pode ser considerado ilimitado em altura.

O modelo e sua esteira estrangulam o escoamento principal, como consequência das dimensões limitadas do túnel de vento. Por conseguinte, o escoamento principal terá sua velocidade média aumentada, a fim de manter a mesma vazão em todas as seções.

Para o vento situado, então, em uma região de velocidades majoradas, tudo se passa como se a velocidade do escoamento não perturbado (V_{ref}) fosse maior que a velocidade de referência corrigida ($V_{\text{ref},c}$).

Deve-se então fazer uma correção do tipo:

$$V_{\text{ref},c} = V_{\text{ref}}(1 + \delta) \quad (4.10)$$

onde:

$$\delta = \delta \left(\frac{A_m}{A_t} \right) \quad (4.11)$$

sendo:

$V_{\text{ref},c}$ = velocidade de referência corrigida;

V_{ref} = velocidade de referência obtida sem efeito de bloqueio;

A_m = área da seção frontal do modelo, ou seja, a área da projeção ortogonal do modelo sobre a seção transversal do túnel;

A_t = área da secção transversal da câmara de ensaio na região do modelo.

Para valores de $A_f/A_t \leq 0,04$ não é usual fazer esta correção. Então, como em nossos ensaios não foi ultrapassado esse limite, a correção não foi considerada nos cálculos dos parâmetros de referência (V_{ref} , q_{ref}).

4.8 – Processamento dos dados dos ensaios

Para determinar os coeficientes de pressão externa no modelo (adimensionais) foi utilizada a seguinte equação:

$$cpe = \frac{\Delta pe}{q_{ref}} = \frac{P - P_{ref}}{1/2 \cdot \rho_{ar} \cdot V_{ref}^2} \quad (4.12)$$

onde:

Δp_e = pressão estática efetiva externa no ponto em estudo, dada pela diferença entre a pressão estática medida no ponto em estudo (p) e a pressão estática de referência (p_{ref});

q_{ref} = pressão dinâmica de referência definida anteriormente.

Sendo que a pressão dinâmica de referência (q_{ref}) foi medida indiretamente pela diferença de pressão entre os anéis piezométricos (Δpa), temos:

$$q_{ref} = k_{(zref)} \cdot \Delta pa \quad (4.13)$$

Logo, podemos encontrar o coeficiente de pressão utilizando a seguinte equação:

$$cpe = \frac{\Delta pe}{k_{(zref)} \cdot \Delta pa} \quad (4.14)$$

A determinação dos coeficientes de pressão foi realizada através da leitura das diferenças de pressão Δpe (em mm) e da diferença de pressão entre os anéis piezométricos Δpa (em mm) nas fotos do multimanômetro, com o auxílio de uma lupa e uma régua milimétrica. Na leitura das diferenças de pressão foi adotada a convenção usual de sinais, ou seja, as sobrepressões correspondem sinais positivos e às sucções, sinais negativos.

4.9 – Resultados dos ensaios

4.9.1 – Coeficientes de pressão externa

As Tabelas B1 até B4 do Anexo B, apresentam os coeficientes de pressão externa, obtidos através do processamento dos resultados dos ensaios em túnel de vento do galpão industrial.

Nas Figuras 38 até 45 são apresentados os perfis transversais, longitudinais e em planta dos coeficientes de pressão externa, para as incidências do vento de 0° (paralelo à parede de 100m) e 90° (perpendicular à parede de 100m) e para vento com $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

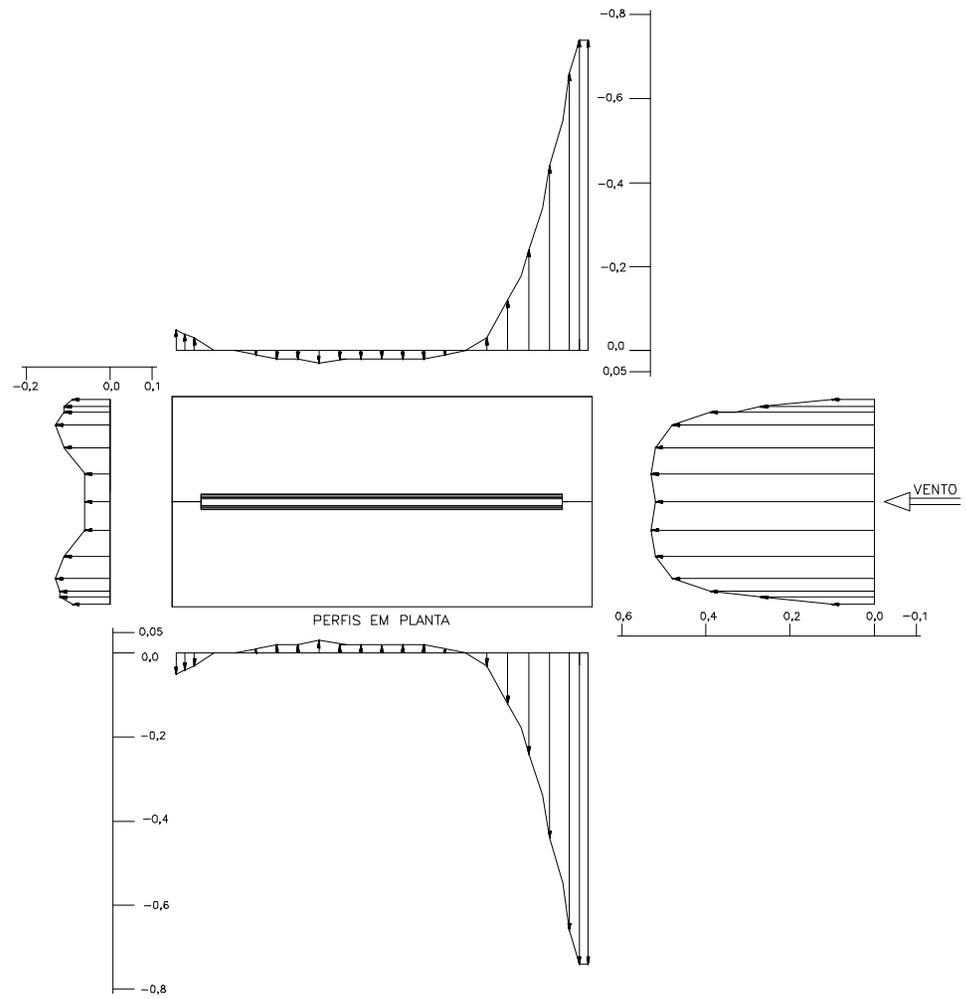


Figura 38: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,11$.

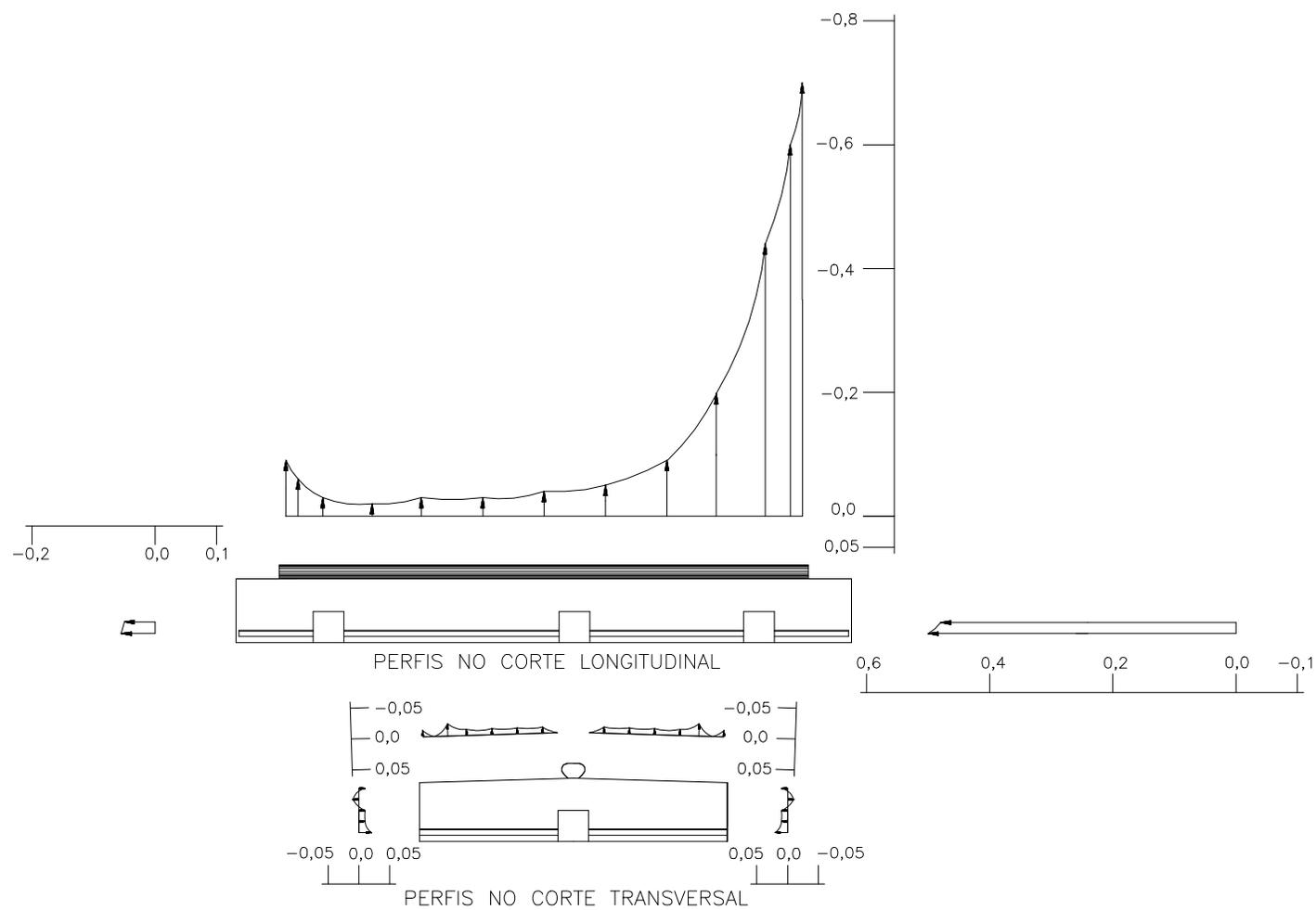


Figura 39: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,11$.

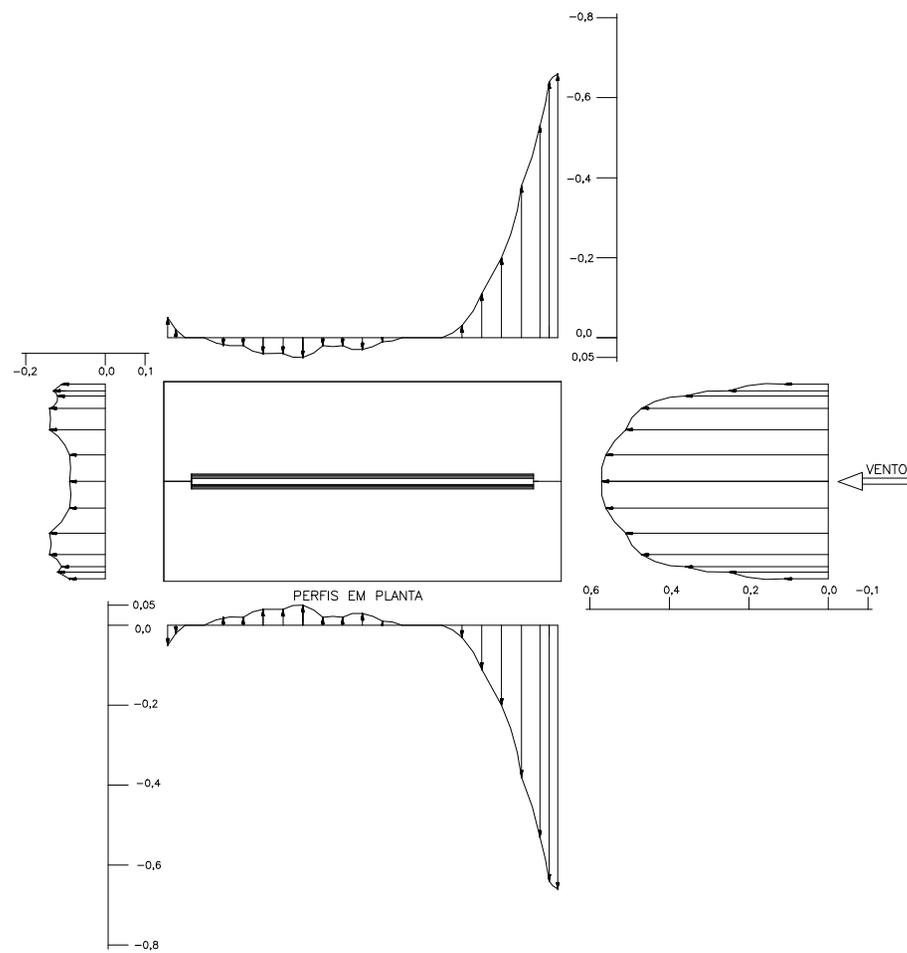


Figura 40: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,23$.

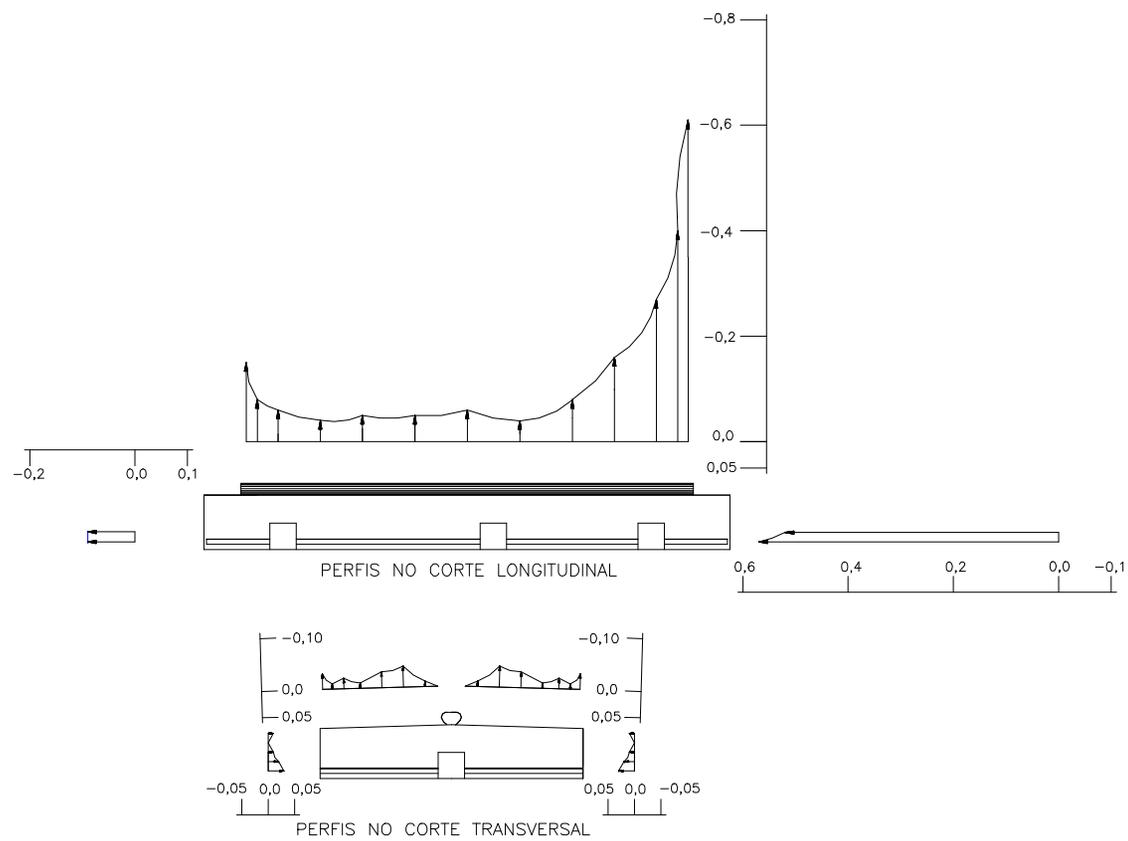


Figura 41: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 0° e $p = 0,23$.

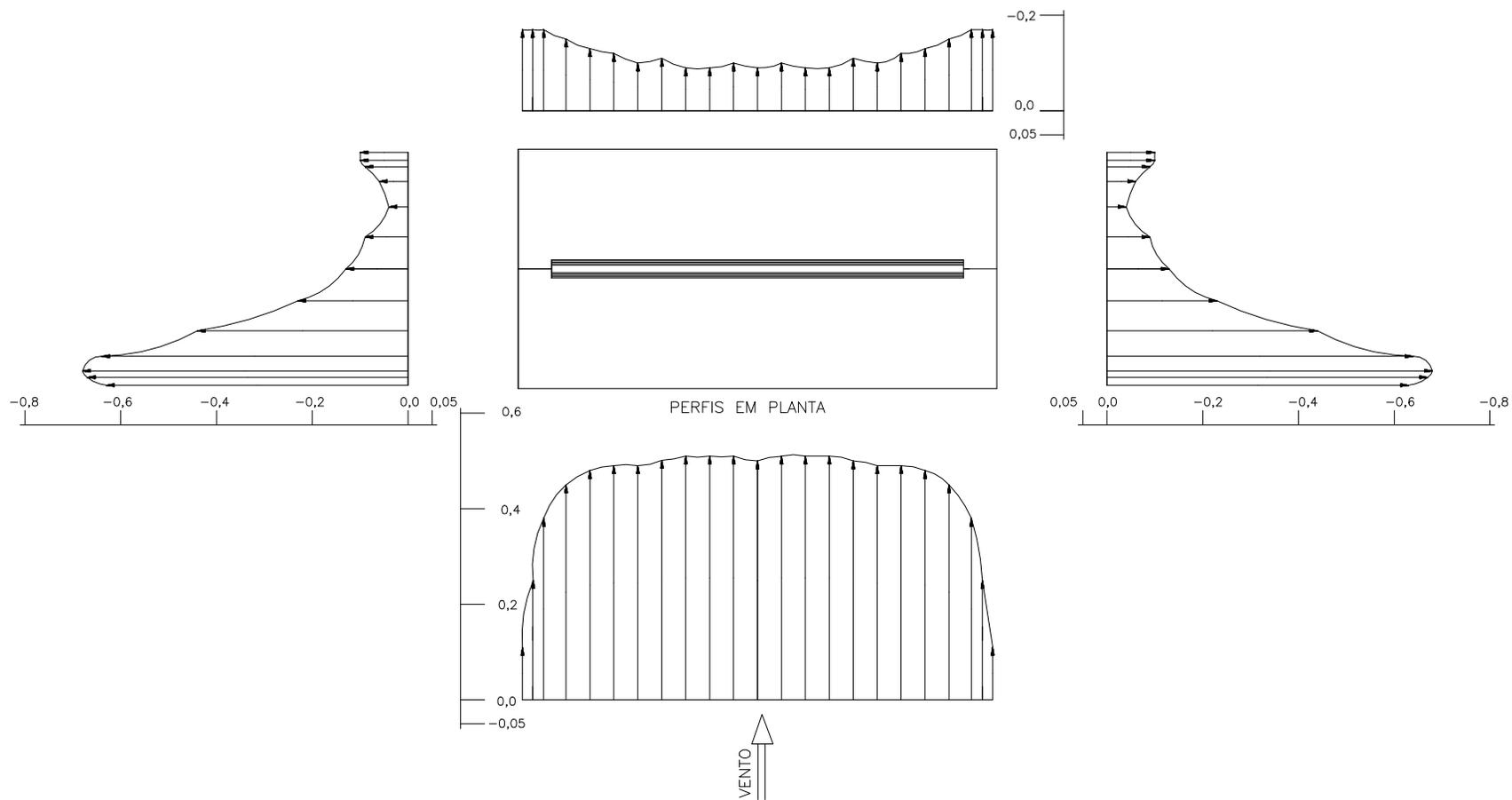


Figura 42: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,11$.

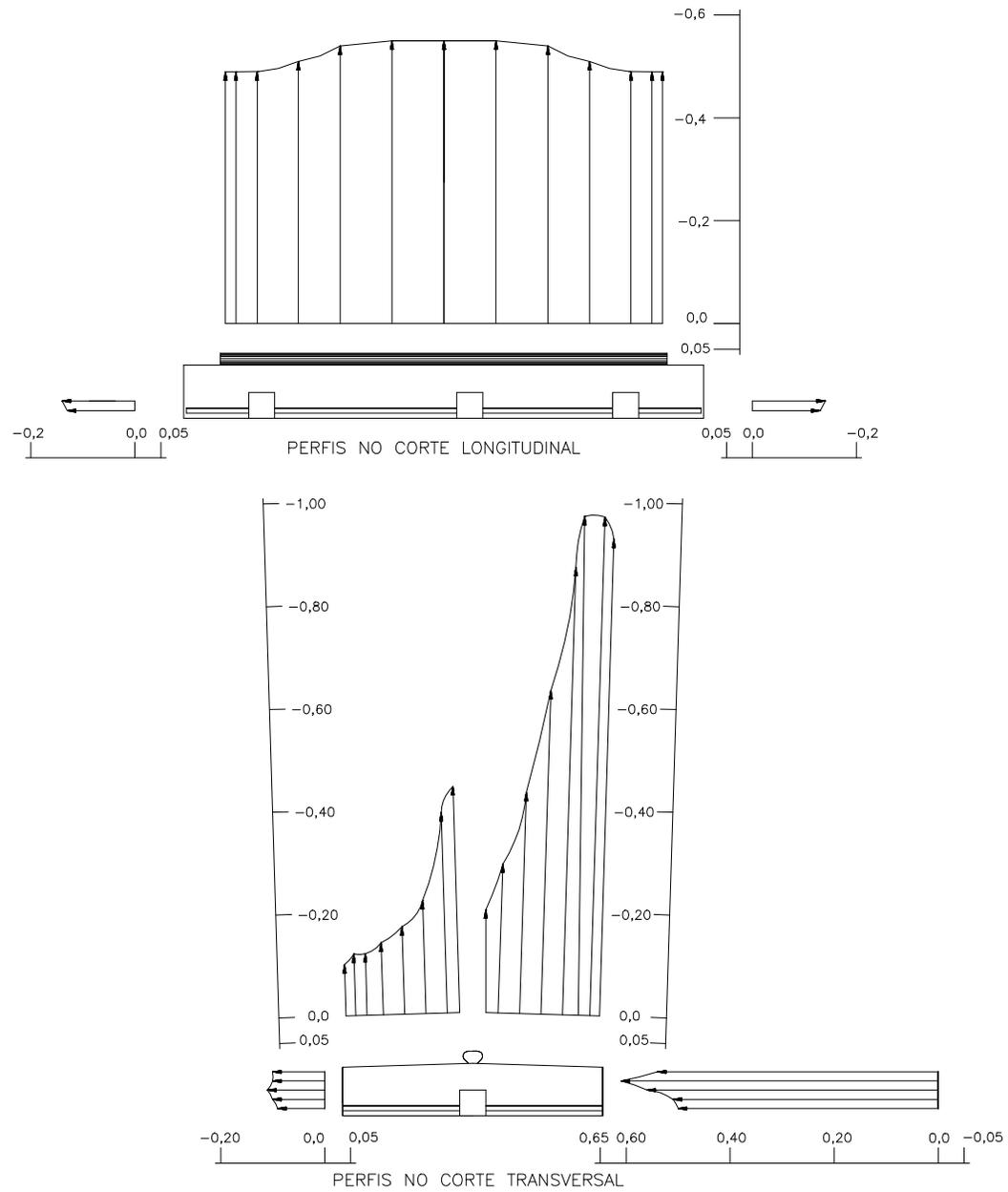


Figura 43: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,11$.

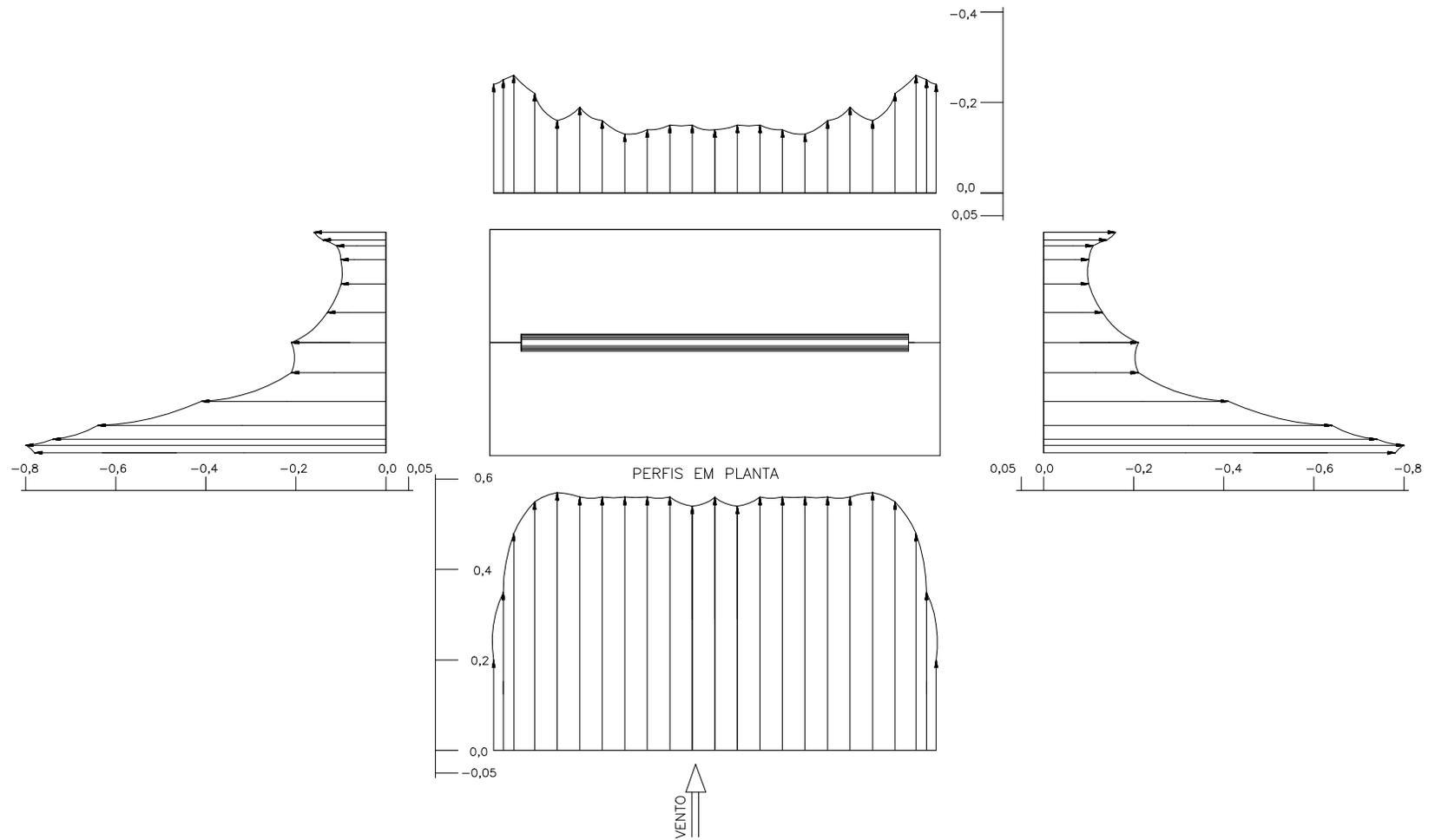


Figura 44: Perfis em planta dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,23$.

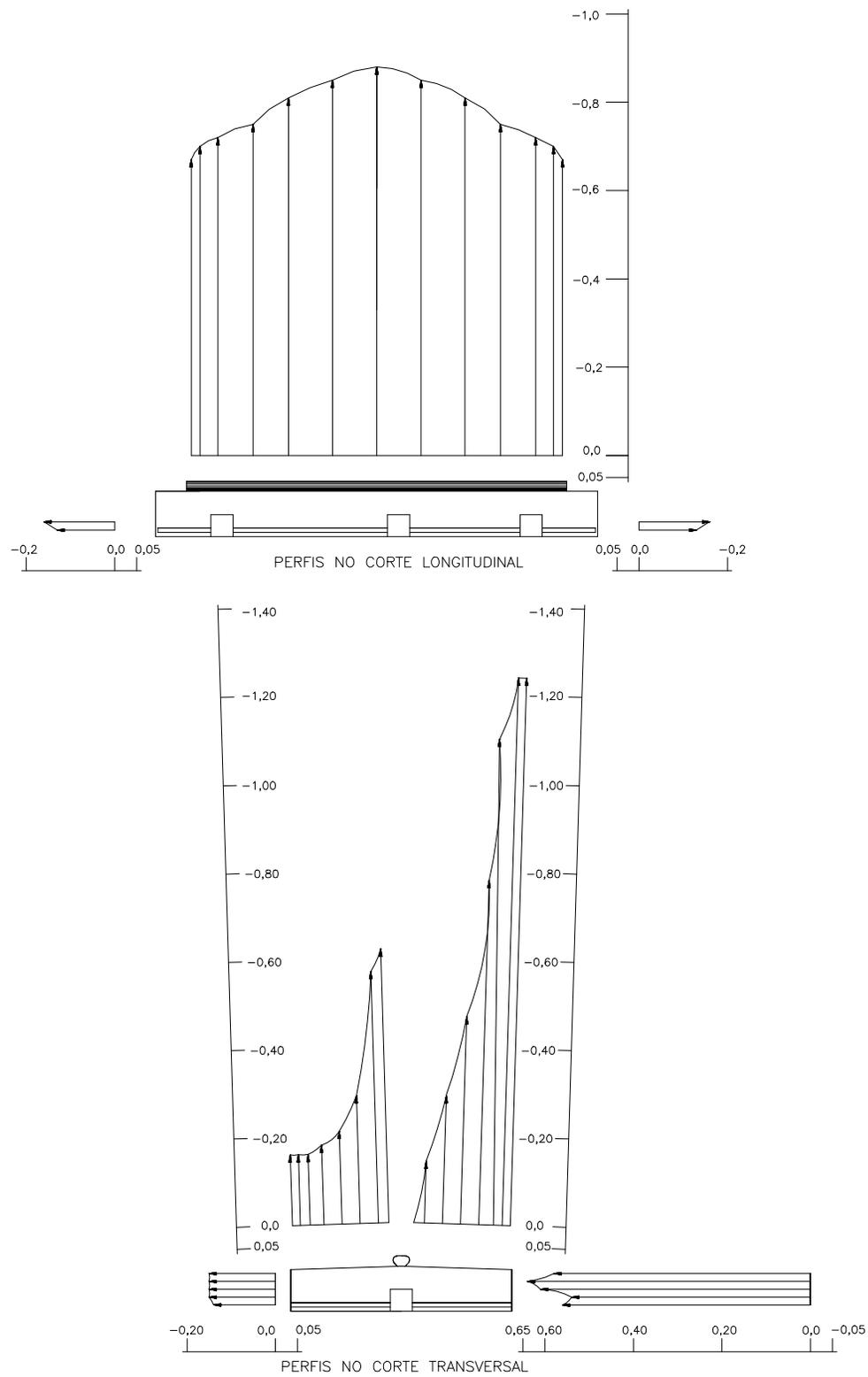


Figura 45: Perfis transversais e longitudinais dos coeficientes de pressão para vento a 90° e $p = 0,23$.

4.10 – Aplicação dos modelos aproximados com os resultados dos ensaios

A seguir são apresentados os resultados da aplicação de alguns dos modelos teóricos empregando os dados de coeficiente de pressão obtidos experimentalmente.

Na Tabela 18 são apresentadas as vazões de ventilação, devido ao efeito do vento, aplicando o procedimento de Clezar e Nogueira, para ângulos de incidência do vento 0° , 45° e 90° . Essas vazões foram calculadas empregando os coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela NBR-6123 e os obtidos nos ensaios. Observar que os valores indicados na Tabela correspondem às médias aritméticas das vazões de entrada e saída. Na Tabela 18 também são apresentadas às relações: vazão de ar obtida com coeficientes de forma segundo a NBR 6123 / vazão de ar calculada com coeficientes de pressão obtidos dos ensaios em túnel de vento.

Tabela 18 – Vazões de entrada ou saída de ar considerando o efeito do vento (Q_v), com $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	VAZÕES DE ENTRADA OU SAÍDA DE AR Q_v (m^3/s)			VAZÃO NBR 6123 / VAZÃO TÚNEL DE VENTO	
	NBR 6123	TÚNEL DE VENTO		TÚNEL DE VENTO	
		$p = 0,11$	$p = 0,23$	$p = 0,11$	$p = 0,23$
0°	60,84	44,41	41,94	1,37	1,45
45°		78,54	87,06		
90°	68,37	81,31	96,65	0,84	0,71

Na Tabela 19 são apresentadas as vazões de ventilação, devido ao efeito chaminé e do vento, aplicando o procedimento de Clezar e Nogueira, para ângulos de incidência do vento 0° , 45° e 90° . Essas vazões foram calculadas empregando os coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela NBR-6123 e os obtidos nos ensaios. Observar que os valores indicados na tabela correspondem às médias aritméticas das vazões de entrada e saída. Na Tabela também são apresentadas as relações: vazão de ar considerando o efeito chaminé e do vento / vazão de ar considerando exclusivamente o efeito chaminé.

Tabela 19 – Vazões de entrada ou saída de ar considerando o efeito chaminé e a ação do vento, para vento com $p = 0,11$ e $0,23$.

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	VAZÕES DE AR TOTAL (m ³ /s)			VAZÃO TOTAL / VAZÃO POR EFEITO CHAMINÉ		
	NBR 6123	TÚNEL DE VENTO		NBR 6123	TÚNEL DE VENTO	
		$p = 0,11$	$p = 0,23$		$p = 0,11$	$p = 0,23$
0°	135,24	133,94	134,37	1,04	1,03	1,03
45°		153,56	157,64		1,18	1,21
90°	147,15	152,10	162,09	1,13	1,17	1,25

Nas Tabelas 20 até 22 são apresentadas as vazões de ventilação, devido ao efeito do vento, nas aberturas localizadas nas diferentes zonas do pavilhão, aplicando o procedimento de Clezar e Nogueira, para ângulos de incidência do vento 0°, 45° e 90°. Essas vazões foram calculadas empregando os coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela NBR-6123 e os obtidos nos ensaios. Observar que valores positivos das vazões correspondem a aberturas com ingresso de ar e valores negativos correspondem aberturas com saída de ar.

Tabela 20 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 0°, com $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 21)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)		
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – NBR 6123 (m ³ /s)	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m ³ /s)	
		$p = 0,11$	$p = 0,23$
C	26,66	19,01	19,16
D	-4,27	-5,96	-7,02
A ₁ , B ₁	-10,43	-10,62	-9,62
A ₂ , B ₂	-13,79	6,30 / -1,66	6,56 / -1,48
A ₃ , B ₃	12,98	10,82 / -0,16	13,02 / -0,02
E, G	-12,60	-13,77	-10,96
F, H	-19,75	0,49 / -10,74	1,79 / -8,49
I, J	21,20	7,79 / -1,48	1,43 / -4,35
Vazão total de entrada ou saída de ar	60,84 / -60,84	44,41 / -44,39	41,96 / -41,94

Tabela 21 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 90° , com $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 20)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)		
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – NBR 6123 (m^3/s)	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m^3/s)	
		$p = 0,11$	$p = 0,23$
A	55,75	43,94	49,60
B	7,77	21,90	25,85
C ₁ , D ₁	-13,25	2,44 / -9,14	5,46 / -5,78
C ₂ , D ₂	4,99	13,04	15,74
E, F, I, G, H, J	-55,00	-72,18	-90,90
Vazão total de entrada ou saída de ar	68,51 / -68,25	81,32 / -81,32	96,65 / -96,68

Tabela 22 – Vazões de entrada ou saída de ar (Q_v), por efeito do vento, nas diferentes aberturas do pavilhão, para vento a 45° , com $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 21)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)	
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m^3/s)	
	$p = 0,11$	$p = 0,23$
C	19,95	21,15
D	5,94 / -1,17	6,55 / -0,23
A ₁ , B ₁	6,44 / -3,78	6,70 / -4,10
A ₂ , B ₂	17,03 / -0,49	20,49
A ₃ , B ₃	29,21	32,20
E, G	-12,95	-13,18
F, H	-34,07	-35,56
I, J	-26,06	-33,95
Vazão total de entrada ou saída de ar	78,57 / -78,52	87,09 / -87,02

Finalmente, nas Tabelas 23, 24 e 25 são apresentadas as vazões de ventilação, devido ao efeito chaminé e do vento, nas aberturas localizadas nas diferentes zonas do pavilhão, aplicando o procedimento de Clezar e Nogueira, para ângulos de incidência do vento 0° , 45° e 90° . Essas vazões foram calculadas empregando os coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela NBR-6123 e os obtidos nos ensaios. Observar que valores positivos das vazões correspondem a aberturas com ingresso de ar e valores negativos correspondem a aberturas com saída de ar. Nas Tabelas 23 e 24, também são apresentadas as relações: vazão de ar calculada com os coeficientes de forma sugeridos pela NBR 6123 (1988) / vazão de ar calculada com os coeficientes de pressão obtidos dos ensaios em túnel de vento.

Tabela 23 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 0° para p = 0,11 e p = 0,23 .

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 21)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)			VAZÃO NBR 6123 / VAZÃO TÚNEL DE VENTO	
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – NBR 6123 (m ³ /s)	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m ³ /s)		p = 0,11	p = 0,23
		P = 0,11	p = 0,23		
C	34,79	29,78	29,53	1,17	1,18
D	21,94	21,90	21,28	1,00	1,03
A ₁ , B ₁	5,77	5,10	6,76	1,13	0,85
A ₂ , B ₂	29,20	30,90	30,56	0,94	0,96
A ₃ , B ₃	41,33	43,98	43,94	0,94	0,94
E, G	-19,60	-21,75	-20,29	0,90	0,97
F, H	-55,50	-50,06	-50,16	1,11	1,11
I, J	-62,34	-64,40	-66,21	0,97	0,94
Vazão total de entrada ou saída de ar	133,03 / -137,44	131,66 / -136,21	132,07 / -136,66	1,01 / 1,00	1,01 / 1,01

Tabela 24 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 90° para p = 0,11 e p = 0,23.

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 20)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)			VAZÃO NBR 6123 / VAZÃO TÚNEL DE VENTO	
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – NBR 6123 (m ³ /s)	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m ³ /s)		p = 0,11	p = 0,23
		P = 0,11	p = 0,23		
A	68,26	59,73	63,96	1,14	1,07
B	40,15	45,94	47,92	0,87	0,84
C ₁ , D ₁	10,46	18,54	20,74	0,56	0,50
C ₂ , D ₂	25,81	25,28	26,72	1,02	0,97
E, F, I, G, H, J	-149,61	-154,70	-164,84	0,97	0,91
Vazão total de entrada ou saída de ar	144,68 / -149,61	149,49 / -154,70	159,34 / -164,84	0,97 / 0,97	0,91 / 0,91

Tabela 25 – Vazões de entrada ou saída de ar nas aberturas do pavilhão nos diferentes setores para efeito simultâneo (ação do vento e efeito chaminé) a 45° para $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

ABERTURAS LOCALIZADAS NO SETOR (vide Figura 21)	MODELO DE CLEZAR E NOGUEIRA (1999)	
	VAZÃO DE ENTRADA OU SAÍDA – TÚNEL DE VENTO (m^3/s)	
	P = 0,11	p = 0,23
C	29,71	30,55
D	22,60	22,84
A ₁ , B ₁	13,04	12,89
A ₂ , B ₂	35,18	36,45
A ₃ , B ₃	50,40	52,21
E, G	-21,81	-21,94
F, H	-61,19	-52,64
I, J	-73,18	-85,75
Vazão total de entrada ou saída de ar	150,93 / -156,18	154,94 / -160,33

4.11 – Análise dos resultados

Os perfis dos coeficientes de pressão externa, para vento a 0° e 90° , com $p = 0,11$ (Figuras 38, 39, 42 e 43), são semelhantes aos obtidos com vento de $p = 0,23$ (Figuras 40, 41, 44 e 45). Entretanto, podem ser observadas variações significativas nas magnitudes dos coeficientes de pressão em função do tipo de vento simulado.

As vazões de entrada ou saída de ar, para ventilação por efeito isolado do vento, para as direções do vento analisadas (0° , 45° e 90°), dependem do tipo de vento simulado (Tabela 18). Mais ainda, significativas diferenças surgem entre as vazões de ventilação calculada com os coeficientes de forma sugeridos pela NBR 6123 (1988) e as obtidas com os coeficientes de pressão calculados a partir dos ensaios em túnel de vento (Tabela 18).

Quando a ventilação resulta da ação simultânea dos efeitos chaminé e do vento (para uma velocidade média do vento de 2,0 m/s), a contribuição da ação do vento na vazão total de ventilação é pequena, razão pela qual as diferenças, citadas no parágrafo anterior, que surgem entre as vazões de ventilação calculadas com a NBR 6123 e as obtidas com os coeficientes experimentais se suavizam (Tabelas 19).

Para vento agindo a 45° os valores das vazões de ventilação (Tabelas 18 e 19) se encontram, aproximadamente, dentro do âmbito de vazões definido pelos valores obtidos para vento agindo a 0° e 90° .

A distribuição das aberturas de entrada e saída de ar, assim como as magnitudes das vazões de entrada e saída de ar, para ventilação por efeito isolado do vento, resultam diferentes quando definidas a partir da NBR 6123 ou dos ensaios em túnel de vento (Tabelas 20 e 21).

A distribuição das aberturas de entrada e saída de ar, para ventilação por ação simultânea dos efeitos chaminé e do vento, não resulta alterada como no caso de ventilação por ação isolada dos ventos (Tabelas 23 e 24). Entretanto, as magnitudes das vazões de entrada e saída podem ser significativamente diferentes se calculadas a partir da NBR 6123 ou dos ensaios em túnel de vento (Tabela 24).

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões da pesquisa

A partir dos resultados apresentados neste trabalho e da análise dos mesmos pode-se concluir que:

- Os modelos teóricos analisados apresentam uma dispersão de resultados compatíveis com o bom exercício da engenharia, sendo que isto não acontece quando os modelos são empregados considerando unicamente o efeito do vento na promoção da ventilação natural.
- As equações propostas neste trabalho podem ser aplicadas para o dimensionamento de sistemas de ventilação natural, pois permitem a obtenção de vazões de ventilação sem iterações, com resultados compatíveis com outros modelos e, além disso, não são empregadas figuras no processo de cálculo como exigem alguns dos modelos analisados.
- Os coeficientes de forma sugeridos pela norma NBR-6123 (1988) podem ser empregados no projeto de sistemas de ventilação natural em construções, como o caso de pavilhão industrial analisado, onde a contribuição do efeito do vento na vazão total de ventilação é pequena em relação à contribuição do efeito chaminé.
- O emprego dos coeficientes da norma NBR-6123 (1988) em edificações onde o efeito chaminé é desprezível, ou, onde o efeito do vento predomina como agente promotor da ventilação natural, pode conduzir a erros significativos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestão para futuros trabalhos recomenda-se:

- Desenvolver o *knowhow* para verificar a eficiência da ventilação natural a partir de ensaios em modelos reduzidos de pavilhões industriais.
- Determinar a aplicabilidade dos modelos teóricos (equações) para o dimensionamento de sistemas de ventilação natural de pavilhões industriais, a partir de ensaios em modelos reduzidos e de medições *in situ*.
- Construir uma curva de taxa de excedência versus velocidade média do vento para a região de Passo Fundo a partir dos dados dos ventos obtidos no Laboratório Anemométrico da Universidade de Passo Fundo - UPF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Handbook Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2001.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Heating, Ventilating, and Air – Conditioning Systems and Equipment. Atlanta: ASHRAE, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. São Paulo, 1988.

AWBI, H. B. *Ventilation of Buildings*. London and New York: E & FN Spon, 1998.

BATURIN, V. V. *Fundamentos de Ventilacion Industrial*. Barcelona: Editorial Labor, 1976.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Lei nº 6514, de 22 de dezembro de 1977 e Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, C. R. *Ventilação industrial*. Florianópolis: UFSC, 1999.

COSTA, E. C. da. *Arquitetura Ecológica: condicionamento térmico natural*. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

EMBRAPA, Embrapa Trigo de Passo Fundo. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/agromet.htm>>. Acesso em: 12 jul. 2004.

FROTA, A. B. *Ventilação de edifícios industriais: modelo paramétrico para dimensionamento de sistemas de ventilação natural por efeito chaminé*. 1989. Tese (Pós-Graduação Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de conforto térmico*. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

MACINTYRE, A. J. *Ventilação Industrial e Controle da Poluição*. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

MASCARÓ, L. *Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo*. São Paulo, Projeto Editores Associados Ltda, 1991.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. *Engenharia de ventilação Industrial*. São Paulo, CETESB, 1988.

SCIGLIANO, S.; HOLLO, V. IVN – Índice de ventilação natural – conforto térmico em edifícios comerciais e industriais em regiões de clima quente. São Paulo: Pini ed.; 2001.

TOLEDO, E. *Ventilação natural das habitações*. Maceió: Edufal, 1999.

Obras consultadas

- ACIOLI, J. de L. *Física básica para arquitetura: mecânica, transmissão de calor, acústica*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994.
- AROSTEGUI, J. M. *Desempenho térmico da janelas: contribuição para o estudo de uma regulamentação de conforto térmico natural nos edifícios*. 1984. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1984.
- BLESSMANN, J. *Pressão interna*. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1991.
- BLESSMANN, J. *Aerodinâmica das construções*. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.
- CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P.; LABAKI, L. C. *Transparência seletiva dos vidros à radiação solar: indicativos para o emprego na construção civil*. In: NUTAU'96, 1996, [S.l.]. *Trabalho apresentado...* [S.l.], 1996.
- COSTA, E. C. da. *Física aplicada à construção: conforto térmico*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.
- CUNHA, E. G. et al. *Elementos de Arquitetura de Climatização Natural: método projetual buscando a eficiência energética nas edificações*. Passo Fundo: UPF, 2003.
- ETHERIDGE, D. W.; SANDBERG, M. *Building Ventilation: theory and measurement*. England: John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- FROTA, A. B. *Controles térmicos naturais e qualidade ambiental*. In: NUTAU'96, 1996, [S.l.]. *Trabalho apresentado...* [S.l.], 1996.
- _____. *Ventilação Natural*. São Paulo, [s.n.: s.d.]. Apostila do curso de Especialização em Conforto Térmico Ambiental e Conservação de Energia.
- JONES, W. P. *Engenharia de ar condicionado*. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1983.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; et. al. *A visualização do conforto ambiental no projeto arquitetônico*. In: ENTAC 98, 7, 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: UFSC, 1998. p. 371-379.
- LAMBERTZ, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. São Paulo: PW Editores, 1997.
- MASCARÓ, L. *Ambiência urbana*. Porto Alegre: Ed. Sagra-DC Luzzatto, 1996.
- MONTENEGRO, G. A. *Ventilação e cobertas: estudo teórico, histórico e descontraído*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.
- OLIVEIRA, M.; GONÇALVES, H. *Comportamento térmico de edifícios solares passivos em Portugal..* In: NUTAU'96, 1996, [S.l.]. *Trabalho apresentado...* [S.l.], 1996.

PALUCH, M. J. *Influência da presença de marquises na distribuição de pressões exercidas pelo vento na cobertura curva de pavilhões industriais*. 1993. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

RAUBER, J. (Coord.) et al. *Apresentação de trabalhos científicos: normas e orientações práticas*. Passo Fundo: UPF Editora, 2002.

RIVERO, R. *Acondicionamento Térmico Natural: Arquitetura e clima*. Porto Alegre: Ed. da Universidade e Luzzato Ed. Ltda, 1985.

ROMERO, M. A. B. et al. *Desempenho das constantes morfológicas. Índices de adequação ambiental da periferia do Distrito Federal*. In: NUTAU'96, 1996, [S.l.]. *Trabalho apresentado...* [S.l.], 1996.

ROMERO, M. A. B. *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo: PW, 1988

SALES, J. J. et al. *Construções em aço: projeto – área de estruturas metálicas*. São Carlos, [s.n.], 1998.

SARAIVA, J. A. G. *Ação do Vento e Nível de Conforto em Espaços Urbanos*. Lisboa: LNEC, 1997.

_____. *Aerodinâmica de edifícios altos: características do escoamento e resposta à turbulência de formas prismáticas*. Lisboa: LNEC, 1983.

SOUZA, H. A. *Conforto térmico*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

VECCHIA, F. *O fator climático e as exigências de conforto térmico na avaliação do ambiente construído*. In: NUTAU'96, 1996, [S.l.]. *Trabalho apresentado...* [S.l.], 1996.

ANEXO A - Cálculo da carga térmica do galpão industrial

O cálculo da carga térmica foi realizado seguindo as recomendações de Mesquita e Guimarães (1988), juntamente com Macintyre (1990).

Para o dimensionamento da carga térmica foi considerado que o galpão industrial possui as seguintes características:

A.1) Fachadas laterais de 100 m:

- 1,0 m de alvenaria, com espessura de 0,15 m;
- 1,50 m de veneziana cor azul clara em chapa de aço pré-pintada duas faces, com marcos de 80 mm de largura, fabricados em espessuras de 0,80 e 0,65 mm;
- 6,50 m de telha metálica, espessura de 0,50 mm, em chapa de aço pré-pintada 02 faces cor escura, sendo 8% da área do fechamento em telha translúcida com espessura de 0,80 mm;
- em cada lateral têm-se 03 portões metálicos com fechamento em telha metálica espessura de 0,50 mm com dimensões de 5,0 m x 5,0 m.

A.2) Oitões de 50 m:

- 1,0 m de alvenaria, com espessura de 0,15 m;
- 1,50 m de janela basculante com vidro transparente;
- acima da cota de 2,50 m, o fechamento será com telha metálica com espessura de 0,50mm pré-pintada duas faces cor azul clara, sendo 8% da área do fechamento em telha translúcida espessura de 0,80 mm;
- em cada oitão têm-se 01 portão de 5,0 m x 5,0 m.

A.3) A cobertura do galpão será com telha metálica galvanizada cor cinza, com espessura de 0,55 mm, com isolamento térmico em lã de vidro de 2", densidade de 16 kg/m^3 , sendo 8% da área de cobertura com placas de policarbonato alveolar branco leitoso com espessura de 6mm, sem isolamento térmico.

A.4) A estrutura de cobertura e pilares, bem como o fechamento lateral acima da cota de 2,50m, será totalmente metálica.

A.5) Carga térmica

A seguir o cálculo da carga térmica:

1) Presença humana:

Segundo Mesquita e Guimarães (1988), a taxa de dissipação de calor metabólico para pessoas levantando pesos é 1.041 Btu/h. Foi considerada a situação de pessoas levantando pesos já que as atividades a serem desenvolvidas no pavilhão envolvem operações de levantamento e transporte manual de peças (carcaças e rotores pesando em média 5 a 8 kg). Então, o calor produzido pelas pessoas (considerando 50 operários) resulta igual a: $1.041 \text{ Btu/hora pessoa} \times 50 \text{ pessoas} \times 0,252 \text{ Kcal/BTU} = 13116,60 \text{ Kcal/h}$.

2) Sistema de iluminação artificial:

Mascaró (1991) especifica para ambientes onde se desenvolvem tarefas “severas moderadamente críticas e prolongadas com detalhes médios” um nível necessário de iluminação artificial de 300 a 750 lux. Adotando para o galpão em análise 500 luxes pode-se inferir que a potência dissipada para o ambiente resulta aproximadamente igual a 30 W/m^2 (MACINTYRE, 1990). Então o calor gerado pelo sistema de iluminação artificial resulta: $30 \text{ W/m}^2 \times 50 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 0,86 \text{ Kcal/h} = 129000 \text{ Kcal/h}$.

3) Motores e equipamentos:

Conforme consulta realizada a uma empresa do ramo, serão localizadas dentro do galpão 20 injetoras de alumínio com potência de 80 KW cada, sendo que, somente 50% da potência das injetoras se transformará em calor, a ser dissipado no ambiente interno do galpão. Resulta, então: $20 \text{ injetoras} \times 80 \text{ KW/injetora} \times 0,50 \times 860 \text{ kcal/KW} = 688.000 \text{ Kcal/h}$.

4) Processos industriais:

Não foi considerada carga térmica gerada pelo processo industrial a ser desenvolvido dentro do galpão.

5) Insolação:**Radiação solar na cobertura:**

O galpão em análise possui fechamento da cobertura em telha metálica com isolamento térmico em lã de vidro, sendo que 8% da área da cobertura é com placas transparentes de policarbonato alveolar branco leitoso. Mesquita e Guimarães (1988), especifica as seguintes taxas de ganho de calor solar pelo telhado:

- Telha metálica com isolamento térmico (chapa de aço corrugado sobre feltro): 18 BTU/h/pé²;
- Placa de policarbonato alveolar branco leitoso (luz de teto voltada para face leste e oeste fortemente inclinada): 180 BTU/h/pé².

Sendo a área de telhas metálicas, com isolamento térmico (lã de vidro) do galpão 4.600 m², resulta: $18 \text{ Btu/h/pé}^2 \times 4600 \text{ m}^2 \times 1 \text{ pé}^2/0,093 \text{ m}^2 \times 0,252 \text{ kcal/BTU} = 224.361,29 \text{ Kcal/h}$.

A área de placas de policarbonato alveolar branco leitoso do galpão é 400m², resulta então: $180 \text{ Btu/h/pé}^2 \times 400 \text{ m}^2 \times 1 \text{ pé}^2/0,093 \text{ m}^2 \times 0,252 \text{ kcal/BTU} = 195.096,77 \text{ Kcal/h}$.

As taxas de calor por metro quadrado acima especificadas, correspondem, a uma latitude de 20° sul. No caso do galpão em análise, localizado a 28° latitude sul, segundo Mesquita e Guimarães (1988), corresponde um fator de correção igual a um, para superfícies perpendiculares ao sol.

Radiação solar nas paredes:

O cálculo da carga térmica devido à radiação solar nas paredes foi feito considerado que as paredes laterais de maior comprimento (100 metros), estão voltadas para os hemisférios leste e oeste, e as paredes dos oitões (largura de 50 metros) estão voltadas para os hemisférios norte e sul, respectivamente.

Abaixo segue a Tabela B1, com as áreas de cada tipo de material que compõe as paredes, bem como, suas respectivas taxas de calor solar, especificadas por Mesquita e Guimarães (1988).

Tabela A1 – Cálculo da radiação solar incidente sobre as paredes laterais e de oitão.

ELEMENTOS	ÁREA DOS ELEMENTOS (m ²)				TAXA DE CALOR SOLAR (BTU/h)				TOTAL (BTU/h)
	LESTE	OESTE	NORTE	SUL	LESTE	OESTE	NORTE	SUL	
Alvenaria	85	85	45	45	247,25	247,25	149,64	52,99	51.150,85
Veneziana metálica	127,50	127,50	-	-	462,25	462,25	-	-	117.873,75
Telha metálica sem lâ	563,50	563,50	316,25	316,25	462,25	462,25	261,87	65,04	624.341,04
Portões metálicos	75	75	25	25	462,25	462,25	261,87	65,04	77.510,25
Janelas basculantes - vidro transparente	-	-	67,50	67,50	-	-	1.371,70	939,12	155.980,35
Telha translúcida	49	49	27,50	27,50	559	559	386,57	72,24	67.399,28
Total de calor (Btu/h)									1.094.255,52
Total de calor (Kcal/h)									275.752,39

Para uma latitude de 28° sul, segundo Mesquita e Guimarães (1988, Tabela 5.16), o fator de correção varia de 1 a 1,07, para paredes leste, oeste, norte e sul. No caso do pavilhão em estudo adotou-se um fator igual a um.

6) Resumo das cargas térmicas em (Kcal/h):

- Presença humana: 13.116,60 Kcal/h;
- Sistema de iluminação artificial: 129.000 Kcal/h;
- Motores e equipamentos: 688.000 Kcal/h;
- Processos industriais:
- Calor solar na cobertura: 419.458,06 Kcal/h;
- Calor solar nas paredes: 275.752,39 Kcal/h;
- Carga térmica total: 1.525.327,05 Kcal/h.

ANEXO B - Coeficientes de pressão externa do vento do galpão ensaiado no túnel de vento

Nos ensaios realizados no túnel de vento para o galpão industrial em análise, foram determinados os coeficientes de pressão externa para ventos nas direções de: 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165°, 180°, 195°, 210°, 225°, 240°, 255°, 270°, 285°, 300°, 315°, 330°, 345°, medidos na referência (3) do túnel de vento. Para todos os vetores de velocidades citados, foram considerados dois tipos de vento ($p = 0,11$ e $p = 0,23$) e, além disso, os coeficientes de pressão externa foram medidos, para uma altura em escala do protótipo do galpão de 10 metros correspondente ao topo da cumeeira.

As Tabelas B1 até B4, apresentam os coeficientes de pressão externa para todos os ângulos descritos neste Anexo B, obtidos na altura do modelo (50mm) correspondente em escala a 10 m do protótipo.

Os coeficientes de pressão (cp) com sinal positivo indicam sobrepressão (pressão positiva) e os coeficientes com sinal negativo indicam sucção (pressão negativa).

Tabela B1 - Coeficientes de pressão das tomadas com $p = 0,11$ para ângulos de 0° até 165° .

TOMADA DE PRESSÃO	COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA c_p											
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
1	-0,04	-0,18	-0,39	-0,55	-0,60	-0,55	-0,52	-0,54	-0,58	-0,55	-0,34	-0,13
2	-0,05	-0,17	-0,39	-0,57	-0,62	-0,56	-0,52	-0,52	-0,51	-0,44	-0,33	-0,13
3	-0,09	-0,21	-0,42	-0,63	-0,71	-0,61	-0,51	-0,48	-0,47	-0,37	-0,29	-0,13
4	-0,20	-0,29	-0,49	-0,74	-0,83	-0,64	-0,50	-0,45	-0,42	-0,35	-0,24	-0,11
5	-0,44	-0,45	-0,54	-0,86	-1,08	-0,77	-0,48	-0,42	-0,40	-0,35	-0,24	-0,14
6	-0,60	-0,57	-0,72	-0,71	-0,90	-0,88	-0,48	-0,40	-0,37	-0,31	-0,23	-0,15
7	-0,70	-0,66	-0,73	-0,60	-0,83	-0,69	-0,47	-0,41	-0,37	-0,32	-0,25	-0,20
8	-0,03	-0,15	-0,27	-0,39	-0,49	-0,45	-0,44	-0,46	-0,42	-0,37	-0,25	-0,13
9	-0,01	-0,15	-0,28	-0,37	-0,50	-0,47	-0,44	-0,47	-0,48	-0,37	-0,25	-0,13
10	-0,02	-0,07	-0,30	-0,37	-0,42	-0,40	-0,39	-0,41	-0,43	-0,38	-0,29	-0,07
11	-0,03	-0,02	-0,09	-0,22	-0,21	-0,23	-0,22	-0,22	-0,20	-0,21	-0,05	-0,03
12	-0,02	-0,04	-0,05	-0,14	-0,16	-0,17	-0,17	-0,17	-0,15	-0,12	-0,03	-0,03
13	-0,02	-0,03	-0,07	-0,12	-0,14	-0,14	-0,14	-0,15	-0,15	-0,11	-0,07	-0,03
14	-0,01	-0,03	-0,07	-0,09	-0,13	-0,13	-0,12	-0,14	-0,16	-0,13	-0,10	-0,05
15	0,00	-0,03	-0,07	-0,11	-0,15	-0,12	-0,12	-0,12	-0,15	-0,12	-0,08	-0,04
16	-0,02	-0,05	-0,10	-0,13	-0,16	-0,13	-0,10	-0,13	-0,16	-0,13	-0,08	-0,04
17	-0,01	-0,09	-0,14	-0,72	-0,18	-0,13	-0,10	-0,14	-0,18	-0,18	-0,14	-0,07
18	-0,01	-0,12	-0,25	-0,24	-0,18	-0,13	-0,10	-0,14	-0,19	-0,26	-0,23	-0,09
19	-0,01	-0,11	-0,29	-0,26	-0,18	-0,13	-0,11	-0,14	-0,19	-0,27	-0,26	-0,08
20	0,00	-0,06	-0,16	-0,18	-0,18	-0,13	-0,10	-0,14	-0,19	-0,19	-0,14	-0,05
21	0,02	-0,04	-0,09	-0,15	-0,18	-0,13	-0,09	-0,14	-0,19	-0,14	-0,07	-0,02
22	0,48	0,45	0,41	0,30	0,10	-0,02	-0,15	-0,37	-0,28	-0,21	-0,19	-0,16
23	0,52	0,49	0,43	0,32	0,10	-0,02	-0,14	-0,35	-0,28	-0,22	-0,19	-0,16
24	0,53	0,44	0,36	0,24	0,05	-0,03	-0,09	-0,23	-0,24	-0,22	-0,22	-0,19
25	0,52	0,39	0,28	0,17	0,02	-0,05	-0,04	-0,15	-0,21	-0,26	-0,26	-0,25
26	0,48	0,31	0,17	0,07	-0,07	-0,07	-0,06	-0,11	-0,21	-0,31	-0,36	-0,26
27	0,39	0,22	0,06	-0,04	-0,13	-0,11	-0,09	-0,09	-0,23	-0,37	-0,41	-0,26
28	0,27	0,11	-0,06	-0,13	-0,19	-0,12	-0,10	-0,10	-0,24	-0,37	-0,43	-0,26
29	0,10	-0,02	-0,17	-0,22	-0,24	-0,13	-0,10	-0,10	-0,27	-0,37	-0,40	-0,26
30	0,02	-0,13	-0,25	-0,27	-0,19	-0,15	-0,10	-0,14	-0,19	-0,19	-0,19	-0,06
31	0,02	-0,05	-0,12	-0,19	-0,20	-0,16	-0,10	-0,14	-0,19	-0,13	-0,07	-0,03
32	0,02	-0,06	-0,14	-0,22	-0,20	-0,15	-0,09	-0,14	-0,19	-0,11	-0,05	-0,02
33	0,01	-0,11	-0,17	-0,25	-0,22	-0,16	-0,09	-0,12	-0,17	-0,11	-0,04	-0,02
34	0,00	-0,15	-0,20	-0,29	-0,26	-0,16	-0,11	-0,09	-0,15	-0,10	-0,04	-0,01
35	-0,03	-0,23	-0,25	-0,29	-0,29	-0,15	-0,10	-0,07	-0,13	-0,10	-0,03	-0,02
36	-0,12	-0,33	-0,35	-0,32	-0,33	-0,18	-0,12	-0,09	-0,12	-0,10	-0,03	-0,03
37	-0,28	-0,46	-0,49	-0,44	-0,38	-0,20	-0,14	-0,11	-0,13	-0,11	-0,07	-0,05
38	-0,24	-0,43	-0,45	-0,40	-0,35	-0,20	-0,13	-0,10	-0,12	-0,11	-0,04	-0,03
39	-0,44	-0,51	-0,54	-0,54	-0,43	-0,22	-0,15	-0,12	-0,12	-0,10	-0,04	-0,04
40	-0,66	-0,54	-0,60	-0,63	-0,53	-0,22	-0,17	-0,13	-0,12	-0,11	-0,04	-0,07
41	-0,74	-0,49	-0,56	-0,57	-0,50	-0,21	-0,17	-0,13	-0,11	-0,11	-0,06	-0,10
42	-0,74	-0,46	-0,51	-0,53	-0,48	-0,20	-0,17	-0,13	-0,11	-0,14	-0,09	-0,13

Tabela B2 - Coeficientes de pressão das tomadas com $p = 0,11$ para ângulos de 180° até 345° .

TOMADA DE PRESSÃO	COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA c_p											
	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
1	-0,04	-0,20	-0,49	-0,63	-0,63	-0,59	-0,58	-0,61	-0,65	-0,64	-0,45	-0,16
2	-0,03	-0,17	-0,45	-0,50	-0,57	-0,57	-0,58	-0,63	-0,68	-0,66	-0,43	-0,16
3	-0,03	-0,17	-0,41	-0,45	-0,52	-0,54	-0,58	-0,68	-0,81	-0,68	-0,48	-0,20
4	-0,02	-0,16	-0,33	-0,39	-0,45	-0,48	-0,52	-0,68	-0,85	-0,69	-0,47	-0,26
5	-0,03	-0,18	-0,30	-0,36	-0,40	-0,45	-0,51	-0,75	-0,96	-0,73	-0,52	-0,43
6	-0,06	-0,20	-0,30	-0,33	-0,38	-0,43	-0,51	-0,82	-0,87	-0,66	-0,70	-0,57
7	-0,09	-0,22	-0,29	-0,32	-0,37	-0,43	-0,50	-0,69	-0,78	-0,58	-0,68	-0,67
8	-0,01	0,00	0,04	0,09	-0,13	-0,16	-0,16	-0,15	-0,11	0,10	0,05	0,02
9	0,01	0,02	0,08	0,07	-0,15	-0,19	-0,20	-0,16	-0,12	0,10	0,09	0,03
10	0,00	0,00	0,01	-0,03	-0,22	-0,29	-0,29	-0,25	-0,18	0,00	0,03	0,01
11	0,00	0,00	-0,03	-0,19	-0,34	-0,41	-0,43	-0,39	-0,30	-0,18	-0,03	-0,03
12	0,00	-0,03	-0,09	-0,40	-0,52	-0,61	-0,63	-0,59	-0,46	-0,38	-0,09	-0,03
13	0,00	-0,04	-0,35	-0,55	-0,75	-0,84	-0,87	-0,82	-0,69	-0,51	-0,29	-0,04
14	-0,02	-0,14	-0,44	-0,62	-0,84	-0,94	-0,97	-0,92	-0,82	-0,57	-0,36	-0,08
15	0,00	-0,15	-0,39	-0,59	-0,83	-0,92	-0,97	-0,91	-0,83	-0,57	-0,36	-0,12
16	0,00	-0,16	-0,39	-0,57	-0,80	-0,89	-0,93	-0,89	-0,79	-0,54	-0,35	-0,14
17	0,02	0,07	0,16	0,32	0,43	0,50	0,54	0,48	0,38	0,28	0,16	0,05
18	0,00	0,08	0,18	0,34	0,47	0,56	0,61	0,54	0,42	0,29	0,17	0,05
19	0,03	0,07	0,16	0,30	0,45	0,52	0,56	0,50	0,38	0,25	0,16	0,05
20	0,03	0,05	0,15	0,29	0,41	0,47	0,51	0,45	0,35	0,24	0,15	0,04
21	0,02	0,05	0,16	0,29	0,42	0,48	0,50	0,46	0,37	0,25	0,16	0,05
22	-0,05	-0,17	-0,21	-0,21	-0,30	-0,36	-0,13	-0,03	0,10	0,30	0,41	0,47
23	-0,06	-0,17	-0,21	-0,22	-0,32	-0,32	-0,11	0,00	0,11	0,31	0,43	0,50
24	-0,06	-0,13	-0,18	-0,20	-0,31	-0,46	-0,23	0,00	0,15	0,36	0,51	0,54
25	-0,11	-0,10	-0,16	-0,21	-0,31	-0,55	-0,44	0,00	0,19	0,43	0,59	0,59
26	-0,13	-0,08	-0,16	-0,20	-0,29	-0,57	-0,64	-0,10	0,22	0,48	0,64	0,60
27	-0,11	-0,07	-0,16	-0,19	-0,26	-0,54	-0,68	-0,25	0,23	0,54	0,66	0,57
28	-0,11	-0,08	-0,16	-0,20	-0,26	-0,53	-0,67	-0,46	0,16	0,54	0,64	0,48
29	-0,09	-0,05	-0,14	-0,19	-0,25	-0,50	-0,63	-0,71	0,00	0,55	0,60	0,32
30	0,02	0,05	0,15	0,27	0,42	0,50	0,53	0,47	0,36	0,24	0,14	0,05
31	0,02	0,04	0,14	0,28	0,41	0,47	0,51	0,46	0,36	0,25	0,14	0,03
32	0,02	0,04	0,13	0,28	0,40	0,47	0,51	0,46	0,38	0,28	0,18	0,05
33	0,03	0,05	0,14	0,27	0,40	0,46	0,51	0,46	0,40	0,30	0,19	0,05
34	0,02	0,05	0,14	0,27	0,40	0,46	0,50	0,46	0,41	0,33	0,20	0,05
35	0,02	0,04	0,13	0,27	0,40	0,46	0,49	0,48	0,46	0,35	0,21	0,05
36	0,01	0,04	0,11	0,26	0,37	0,44	0,49	0,49	0,49	0,38	0,21	0,03
37	0,00	0,03	0,10	0,26	0,36	0,44	0,48	0,51	0,55	0,43	0,24	0,02
38	0,00	0,03	0,10	0,24	0,34	0,42	0,48	0,52	0,55	0,42	0,23	0,02
39	0,00	0,02	0,09	0,26	0,30	0,39	0,45	0,56	0,61	0,46	0,25	0,00
40	-0,03	0,00	0,05	0,15	0,22	0,28	0,38	0,55	0,65	0,53	0,29	-0,11
41	-0,04	0,00	0,01	0,07	0,12	0,16	0,25	0,47	0,63	0,54	0,26	-0,41
42	-0,05	0,00	-0,04	0,02	0,04	0,04	0,11	0,35	0,58	0,55	0,15	-0,70

Tabela B3 - Coeficientes de pressão das tomadas com $p = 0,23$ para ângulos de 0° até 165° .

TOMADA DE PRESSÃO	COEFICIENTE DE PRESSÃO EXTERNA c_p											
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
1	-0,06	-0,20	-0,46	-0,67	-0,76	-0,84	-0,82	-0,78	-0,76	-0,63	-0,42	-0,15
2	-0,04	-0,20	-0,46	-0,67	-0,78	-0,79	-0,79	-0,73	-0,70	-0,57	-0,39	-0,14
3	-0,08	-0,23	-0,51	-0,71	-0,81	-0,78	-0,74	-0,69	-0,65	-0,52	-0,35	-0,15
4	-0,16	-0,29	-0,55	-0,82	-0,90	-0,78	-0,70	-0,64	-0,59	-0,49	-0,33	-0,12
5	-0,27	-0,40	-0,59	-0,90	-1,06	-0,86	-0,67	-0,60	-0,55	-0,47	-0,33	-0,15
6	-0,40	-0,51	-0,64	-0,80	-1,02	-0,89	-0,66	-0,53	-0,49	-0,42	-0,31	-0,16
7	-0,61	-0,64	-0,67	-0,74	-0,88	-0,76	-0,65	-0,54	-0,47	-0,41	-0,33	-0,22
8	-0,03	-0,17	-0,34	-0,51	-0,59	-0,63	-0,61	-0,60	-0,59	-0,46	-0,31	-0,13
9	0,00	-0,17	-0,34	-0,49	-0,60	-0,65	-0,62	-0,60	-0,59	-0,46	-0,31	-0,12
10	0,00	-0,13	-0,36	-0,49	-0,56	-0,61	-0,57	-0,56	-0,57	-0,46	-0,33	-0,08
11	-0,05	-0,06	-0,16	-0,25	-0,28	-0,31	-0,29	-0,29	-0,26	-0,22	-0,11	-0,04
12	-0,04	-0,06	-0,10	-0,16	-0,19	-0,19	-0,21	-0,21	-0,16	-0,14	-0,07	-0,04
13	0,00	-0,05	-0,11	-0,14	-0,19	-0,18	-0,18	-0,17	-0,16	-0,14	-0,08	-0,03
14	0,00	-0,05	-0,10	-0,14	-0,16	-0,15	-0,16	-0,17	-0,20	-0,16	-0,11	-0,05
15	0,00	-0,06	-0,12	-0,14	-0,17	-0,15	-0,16	-0,16	-0,17	-0,15	-0,10	-0,04
16	-0,03	0,07	-0,13	-0,15	-0,19	-0,15	-0,16	-0,16	-0,17	-0,15	-0,10	-0,03
17	0,00	-0,11	-0,18	-0,19	-0,19	-0,16	-0,15	-0,18	-0,21	-0,19	-0,16	-0,07
18	0,00	-0,13	-0,26	-0,24	-0,21	-0,15	-0,15	-0,18	-0,21	-0,26	-0,24	-0,11
19	0,00	-0,15	-0,28	-0,26	-0,21	-0,15	-0,15	-0,18	-0,21	-0,25	-0,25	-0,12
20	0,00	-0,10	-0,18	-0,21	-0,21	-0,16	-0,15	-0,18	-0,24	-0,19	-0,16	-0,08
21	0,02	-0,05	-0,13	-0,20	-0,21	-0,15	-0,14	-0,16	-0,22	-0,16	-0,10	-0,01
22	0,52	0,52	0,42	0,25	0,11	-0,06	-0,16	-0,38	-0,34	-0,28	-0,20	-0,15
23	0,57	0,56	0,44	0,28	0,11	-0,04	-0,14	-0,32	-0,34	-0,27	-0,19	-0,15
24	0,56	0,52	0,40	0,20	0,05	-0,04	-0,10	-0,22	-0,28	-0,24	-0,24	-0,20
25	0,51	0,48	0,33	0,16	0,02	-0,06	-0,08	-0,14	-0,22	-0,24	-0,28	-0,24
26	0,47	0,38	0,23	0,05	-0,06	-0,10	-0,10	-0,12	-0,16	-0,29	-0,41	-0,27
27	0,36	0,27	0,11	-0,07	-0,12	-0,13	-0,11	-0,12	-0,15	-0,37	-0,47	-0,27
28	0,25	0,14	-0,03	-0,18	-0,20	-0,16	-0,14	-0,12	-0,15	-0,41	-0,50	-0,27
29	0,11	-0,02	-0,18	-0,31	-0,25	-0,18	-0,16	-0,12	-0,18	-0,41	-0,49	-0,27
30	-0,02	-0,14	-0,27	-0,26	-0,22	-0,19	-0,15	-0,18	-0,21	-0,20	-0,20	-0,10
31	-0,01	-0,06	-0,16	-0,20	-0,23	-0,19	-0,15	-0,17	-0,23	-0,17	-0,08	-0,02
32	0,00	-0,08	-0,15	-0,24	-0,24	-0,18	-0,15	-0,16	-0,18	-0,16	-0,08	-0,02
33	0,00	-0,11	-0,19	-0,25	-0,24	-0,20	-0,14	-0,13	-0,17	-0,15	-0,08	0,00
34	0,00	-0,14	-0,25	-0,28	-0,28	-0,20	-0,13	-0,12	-0,16	-0,15	-0,06	0,00
35	-0,03	-0,20	-0,31	-0,31	-0,29	-0,23	-0,16	-0,10	-0,13	-0,11	-0,05	0,00
36	-0,11	-0,33	-0,42	-0,35	-0,34	-0,24	-0,19	-0,11	-0,12	-0,11	-0,06	0,00
37	-0,24	-0,52	-0,61	-0,58	-0,41	-0,26	-0,18	-0,14	-0,11	-0,11	-0,09	-0,10
38	-0,20	-0,46	-0,53	-0,46	-0,39	-0,28	-0,16	-0,12	-0,11	-0,11	-0,08	-0,02
39	-0,38	-0,61	-0,66	-0,61	-0,45	-0,32	-0,22	-0,16	-0,11	-0,12	-0,07	-0,04
40	-0,53	-0,68	-0,75	-0,75	-0,54	-0,32	-0,26	-0,18	-0,10	-0,12	-0,08	-0,06
41	-0,64	-0,68	-0,74	-0,78	-0,51	-0,30	-0,25	-0,20	-0,08	-0,12	-0,10	-0,08
42	-0,66	-0,61	-0,69	-0,73	-0,49	-0,28	-0,24	-0,20	-0,08	-0,14	-0,15	-0,11

Tabela B4 - Coeficientes de pressão das tomadas com $p = 0,23$ para ângulos de 180° até 345° .

TOMADA DE PRESSÃO	COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA c_p											
	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
1	-0,06	-0,23	-0,58	-0,76	-0,88	-0,95	-0,94	-0,94	-0,85	-0,71	-0,47	-0,16
2	-0,05	-0,21	-0,52	-0,68	-0,83	-0,93	-0,91	-0,94	-0,87	-0,75	-0,44	-0,16
3	-0,05	-0,21	-0,48	-0,66	-0,82	-0,91	-0,89	-0,94	-0,95	-0,82	-0,47	-0,20
4	-0,04	-0,18	-0,41	-0,56	-0,70	-0,79	-0,80	-0,90	-0,94	-0,81	-0,47	-0,21
5	-0,06	-0,21	-0,39	-0,51	-0,62	-0,68	-0,77	-0,92	-1,01	-0,80	-0,50	-0,33
6	-0,08	-0,22	-0,37	-0,46	-0,58	-0,63	-0,74	-0,93	-0,98	-0,77	-0,57	-0,44
7	-0,15	-0,25	-0,35	-0,42	-0,52	-0,62	-0,70	-0,84	-0,85	-0,72	-0,58	-0,61
8	-0,04	0,02	0,04	0,00	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,00	0,02	0,04	0,02
9	0,00	0,03	0,07	0,00	-0,04	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,03
10	-0,02	0,00	0,00	-0,07	-0,13	-0,13	-0,14	-0,10	-0,10	-0,05	0,02	0,01
11	-0,02	0,00	-0,07	-0,17	-0,25	-0,29	-0,29	-0,24	-0,21	-0,14	-0,03	0,00
12	-0,02	-0,02	-0,12	-0,27	-0,40	-0,45	-0,47	-0,42	-0,33	-0,24	-0,08	-0,02
13	-0,02	-0,05	-0,22	-0,47	-0,65	-0,78	-0,78	-0,71	-0,54	-0,36	-0,15	-0,02
14	-0,04	-0,11	-0,37	-0,69	-0,95	-1,10	-1,10	-1,03	-0,83	-0,56	-0,27	-0,04
15	-0,02	-0,13	-0,45	-0,79	-1,06	-1,24	-1,24	-1,14	-1,00	-0,68	-0,33	-0,08
16	-0,02	-0,15	-0,49	-0,80	-1,06	-1,24	-1,24	-1,14	-1,00	-0,72	-0,38	-0,10
17	0,02	0,12	0,21	0,32	0,49	0,58	0,58	0,50	0,39	0,28	0,17	0,08
18	0,00	0,12	0,24	0,40	0,53	0,62	0,64	0,58	0,44	0,32	0,19	0,08
19	0,02	0,12	0,23	0,37	0,51	0,58	0,61	0,55	0,42	0,32	0,19	0,08
20	0,03	0,08	0,22	0,34	0,45	0,54	0,54	0,51	0,40	0,28	0,19	0,08
21	0,04	0,08	0,23	0,37	0,48	0,54	0,56	0,51	0,40	0,28	0,17	0,08
22	-0,09	-0,17	-0,22	-0,27	-0,40	-0,35	-0,16	-0,03	0,11	0,32	0,46	0,52
23	-0,09	-0,17	-0,23	-0,29	-0,37	-0,30	-0,12	0,00	0,13	0,33	0,50	0,57
24	-0,09	-0,12	-0,22	-0,33	-0,46	-0,43	-0,21	0,00	0,17	0,41	0,54	0,61
25	-0,14	-0,10	-0,21	-0,33	-0,50	-0,60	-0,41	-0,04	0,24	0,47	0,61	0,66
26	-0,14	-0,09	-0,20	-0,30	-0,49	-0,75	-0,64	-0,17	0,25	0,52	0,62	0,66
27	-0,12	-0,08	-0,20	-0,27	-0,49	-0,74	-0,74	-0,29	0,23	0,54	0,62	0,63
28	-0,13	-0,08	-0,21	-0,29	-0,47	-0,73	-0,80	-0,42	0,20	0,54	0,58	0,51
29	-0,11	-0,08	-0,19	-0,25	-0,45	-0,67	-0,78	-0,59	0,04	0,54	0,53	0,38
30	0,02	0,08	0,21	0,35	0,48	0,56	0,56	0,50	0,42	0,29	0,17	0,08
31	0,02	0,08	0,20	0,33	0,45	0,53	0,54	0,51	0,38	0,29	0,17	0,07
32	0,02	0,08	0,21	0,35	0,49	0,53	0,56	0,53	0,42	0,29	0,18	0,08
33	0,05	0,08	0,21	0,35	0,49	0,52	0,56	0,53	0,44	0,33	0,19	0,09
34	0,04	0,08	0,21	0,35	0,45	0,49	0,56	0,54	0,46	0,33	0,20	0,09
35	0,04	0,08	0,20	0,33	0,45	0,49	0,56	0,59	0,48	0,35	0,21	0,11
36	0,02	0,07	0,16	0,30	0,41	0,48	0,56	0,57	0,50	0,38	0,22	0,08
37	0,01	0,05	0,16	0,27	0,40	0,45	0,58	0,61	0,56	0,42	0,22	0,04
38	0,02	0,05	0,15	0,27	0,40	0,45	0,57	0,59	0,55	0,42	0,22	0,04
39	0,00	0,06	0,13	0,21	0,33	0,40	0,55	0,63	0,61	0,47	0,25	0,00
40	0,00	0,02	0,07	0,14	0,21	0,30	0,48	0,61	0,65	0,52	0,25	-0,15
41	-0,02	0,02	0,02	0,05	0,10	0,16	0,35	0,50	0,62	0,53	0,18	-0,31
42	-0,05	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,20	0,40	0,58	0,50	0,08	-0,49