



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Enaira Hoffmann de Oliveira

**ESTUDO DE PARÂMETROS DA VENTILAÇÃO NATURAL PARA
MAXIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Passo Fundo
2012

Enaira Hoffmann de Oliveira

**ESTUDO DE PARÂMETROS DA VENTILAÇÃO NATURAL PARA
MAXIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Orientador: Professor Moacir Kripka, Dr.

Coorientador: Professor Acir Mércio Loredo Souza, Ph.D.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo
2012

Enaira Hoffmann de Oliveira

**ESTUDO DE PARÂMETROS DA VENTILAÇÃO NATURAL PARA
MAXIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de aprovação: Passo Fundo, 12 de Dezembro de 2012.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Prof. Dr. Moacir Kripka
Orientador

Prof. Ph.D. Acir Mércio Loredou Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Coorientador

Prof. Dr. Lutgardes de Oliveira Neto
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)

Prof. Dr. Luiz Edson Saraiva
Universidade de Passo Fundo (UPF)

Prof^a. Dr^a. Rosa Maria Locatelli Kalil
Universidade Passo Fundo (UPF)

Passo Fundo
2012

Agradecimento

Agradeço a DEUS pela oportunidade de vencer mais esse desafio.

Agradeço aos orientadores, Prof. Moacir Kripka e Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, pela confiança e apoio na realização deste trabalho.

Aos professores do PPGEng pelos ensinamentos passados, aos funcionários da Universidade de Passo Fundo pela amizade e aos funcionários do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do sul, pelo apoio e dedicação na execução dos ensaios.

Agradeço a minha família, pela compreensão nas ausências e incentivo nos momentos difíceis, durante a realização desta dissertação.

Agradeço aos queridos amigos que fiz durante o curso de pós-graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo.

Esta pesquisa foi financiada pela CAPES, a qual agradeço imensamente e pela UPF pela bolsa de estudos disponibilizada para a execução desta pesquisa.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.
Franklin D. Roosevelt

RESUMO

A preocupação com o aumento do consumo de energia para o condicionamento térmico das edificações e com o bem estar dos ocupantes incentiva a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios. A otimização do sistema de ventilação natural em fábricas pode contribuir para a diminuição do consumo de aparelhos condicionadores de ar, trazendo benefícios ao meio ambiente tais como a redução no consumo de energia elétrica e o aumento do conforto térmico. Neste sentido, a ventilação natural é uma das estratégias de condicionamento natural que proporciona conforto térmico a um ambiente industrial. Apesar de sua importância, as diretrizes construtivas que envolvem o desempenho térmico do edifício são determinadas na sua maioria de forma empírica, não abrangendo todos os fatores que fazem parte do projeto. Este trabalho propõe a aplicação de técnicas de otimização utilizando os parâmetros de conforto ambiental nos ambientes industriais. Busca-se maximizar o conforto térmico em pavilhões, com ou sem efeito do vento, tendo como variáveis as dimensões e as disposições das aberturas, reduzindo o consumo de energia com base na metodologia escolhida para posterior aplicação em projetos. A partir da simulação de diversas configurações de aberturas e dimensões de pavilhões, foram determinados como resultados parâmetros como relação entre as áreas das aberturas e o volume do pavilhão, relação entre área das aberturas e área do piso do pavilhão e relação entre áreas de entrada e de saída das aberturas. Essas relações otimizadas foram comparadas com valores de referência indicados na literatura técnica. Dentre os resultados obtidos as simulações indicaram que, considerando o efeito do vento, ocorre uma grande diminuição das áreas das aberturas calculadas, comparativamente aos casos em que a ventilação ocorre apenas por efeito chaminé.

Palavras-chaves: *Otimização, pavilhões industriais, ventilação natural, conforto térmico.*

ABSTRACT

The concern with the increase of energy consumption for the building thermal conditioning and the occupant wellbeing encourages the evaluation of buildings regarding their environmental performance. The natural ventilation optimization in factories can contribute to the decreasing of energy consumption by the use of air conditioners, resulting in environmental benefits like electric energy reduction and the thermal comfort increasing. Thereby, the natural ventilation is one of the strategies of natural conditioning offering thermal comfort to an industrial environment. Despite its importance, the construction guidelines that involve the building thermal improvement are mostly determined empirically, do not comprehending all the short of factors of a project. This work proposes the applying of these optimization techniques using the environmental comfort parameters in industrial environments. The aim is to maximize the thermal comfort in pavilions, with or without wind effects, using as variables the dimensions and the openings positions, reducing the energy consumption based on the chosen methodology for subsequent projects. From the simulations using a set of opening and pavilion sizes and configurations, the relation between opening areas and the pavilion volumes, the relation between the opening areas and the pavilion floor areas and the relation between enter and exit opening areas were pointed out as parameters for the project. These optimized relations were compared with data available in technical literature. Among others, simulation results indicate a huge reduction in opening areas needed, when Wind plays a major role, if compared with the cases in which there are just the chimney effect.

Keywords: *optimizing, industrial pavilions, natural ventilation, thermal comfort.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ventilação para climas temperados, ventilação de inverno e ventilação de verão.	17
Figura 2: Ventilação por Ação dos Ventos	18
Figura 3: Pressões do ar diante da ventilação cruzada.	19
Figura 4: Esquema de ventilação unilateral	19
Figura 5: Efeito chaminé	20
Figura 6: Ventilação local e ventilação geral	22
Figura 7: Venezianas industriais	30
Figura 8: Fluxograma dos fatores determinantes para o conforto térmico	32
Figura 9: Pavilhão industrial com aberturas	32
Figura 10: Efeito do fluxo de ar	33
Figura 11: Efeito do fluxo de ar em aberturas oblíquas	33
Figura 12: Efeito do fluxo de ar em aberturas perpendiculares	34
Figura 13: Partes da NBR 15220- Desempenho Térmico de Edificações	38
Figura 14: Zoneamento Bioclimático brasileiro (1999)	38
Figura 15: Gráfico de incremento de vazão de ar causado pelo fato das aberturas não serem iguais.	41
Figura 16: Gráfico para a determinação da vazão total (efeito chaminé + ação dos ventos)	41
Figura 17: Curva de variação do coeficiente K_o segundo a variação da relação A_e / A_s.	43
Figura 18: Cotas e parâmetros físicos para o ar	44
Figura 19: Efeito de aberturas desiguais	48
Figura 20: Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada	48
Figura 21: Ventilação cruzada devida ação da diferença de temperatura com duas aberturas por fachada	50
Figura 22: Ventilação cruzada devida ação combinada dos ventos e da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada	51
Figura 23: Ventilação unilateral devida à ação dos ventos em uma única abertura	51
Figura 24: Ventilação unilateral devida ação da diferença de temperatura em uma única abertura	52
Figura 25: Ventilação unilateral devida à ação da temperatura em duas aberturas	52
Figura 26: Classificação dos métodos clássicos	60
Figura 27: Pavilhão industrial com variáveis	63
Figura 28: Pavilhão industrial indicando peitoril mínimo	64
Figura 29: Pavilhão industrial com restrição	64
Figura 30: Pavilhão industrial com restrição	65
Figura 31: Janela dos parâmetros do Solver	67
Figura 32: Microsoft Excel – Opções do Solver	68
Figura 33: Planilha de cálculo - vazão de ar nas aberturas por diferença de temperatura	70
Figura 34: Modelo de pavilhão industrial	72
Figura 35: Comparação das áreas das aberturas considerando o efeito do vento	73
Figura 36: Método ASHRAE (2001)	75
Figura 37: Comparação das áreas das aberturas considerando o efeito chaminé	76
Figura 38: Comparação das áreas das aberturas com o uso dos efeitos do vento e chaminé	77
Figura 39: Modelo Tipo 1	79
Figura 40: Modelo Tipo 2	79
Figura 41: Modelo Tipo 3	80
Figura 42: Planilha com áreas obtidas nas simulações	81
Figura 43: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	83
Figura 44: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	83
Figura 45: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	83
Figura 46: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	84
Figura 47: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	84
Figura 48: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	84
Figura 49: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	85
Figura 50: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	85
Figura 51: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados	85
Figura 52: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	86
Figura 53: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	86
Figura 54: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	86
Figura 55: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	87
Figura 56: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	87
Figura 57: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados	87

Figura 58: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados.....	88
Figura 59: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados.....	88
Figura 60: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados.....	88
Figura 61: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	89
Figura 62: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	89
Figura 63: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	89
Figura 64: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	90
Figura 65: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	90
Figura 66: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	90
Figura 67: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	91
Figura 68: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	91
Figura 69: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados	91
Figura 70: Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.....	94
Figura 71: Circuito Aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	96
Figura 72: Sonda utilizada modelo 55P11 (fio reto).....	97
Figura 73: Calibração da sonda	98
Figura 74: Modelo do pavilhão industrial com as aberturas livres para passagem do escoamento.....	101
Figura 75: Planta baixa do pavilhão- localização das sondas	101
Figura 76: Modelo do pavilhão- localização das sondas	102
Figura 77: Planta baixa da configuração 1.....	102
Figura 78: Planta baixa da configuração 2.....	102
Figura 79: Planta baixa da configuração 3.....	103
Figura 80: Fechamento das aberturas do modelo com fita de alumínio.....	103
Figura 81: Posição das aberturas no pavilhão 1 – planta baixa	107
Figura 82: Posição das aberturas no pavilhão 2 – planta baixa	108
Figura 83: Posição das aberturas no pavilhão 2 – planta baixa	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Trocas de ar por hora, (N)	24
Tabela 2 Ração de ar por pessoa.....	25
Tabela 3 - Coeficientes de vazão.....	35
Tabela 4 Tabela de dimensionamento de vãos - Código de Obras Passo Fundo - RS	39
Tabela 6 Áreas de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento	73
Tabela 7 Resultados otimizados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito do vento.....	73
Tabela 8 Resultados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito chaminé	74
Tabela 9 Resultados otimizados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito chaminé	75
Tabela 10 Tabela de configurações de dimensionamento dos pavilhões.....	78
Tabela 10 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 1 para vento $p = 0,11$	104
Tabela 11 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 1 para vento $p = 0,23$	105
Tabela 12 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 2 para vento $p = 0,11$	105
Tabela 13 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 2 para vento $p = 0,23$	105
Tabela 14 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 3 para vento $p = 0,11$	106
Tabela 15 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 3 para vento $p = 0,23$	106
Tabela 16 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 1 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s	107
Tabela 17 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 2 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s	108
Tabela 18 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 3 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s	109
Tabela 19 Áreas e Vazões de ar nas aberturas do pavilhão encontradas com o método de Clezar e Nogueira (1999).....	110
Tabela 20 Áreas e Vazões de ar nas aberturas do pavilhão encontradas com o ensaio do túnel de vento.	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações Iniciais	12
1.2	Objetivo Geral	14
1.3	Objetivos específicos	14
1.4	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Ventilação Natural	16
2.1.1	Ventilação por ação dos ventos	18
2.1.2	Ventilação por efeito chaminé	19
2.1.3	Ventilação Industrial	21
2.2	Conforto Térmico	26
2.3	Índices de Conforto Térmico	27
2.4	Aberturas: Tipologia, dimensionamento e fluxos de ar	29
2.5	Normas Técnicas	35
2.5.1	Normas Internacionais	35
2.5.2	Normas Brasileiras e outras legislações	37
2.6	Cálculo de vazão de ar- Métodos Empíricos	40
2.6.1	Método da ASHRAE (2001)	40
2.6.2	Método de Frota (FROTA, 1989; FROTA E SCHIFFER, 2001)	42
2.6.3	Método de Clezar e Nogueira (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999)	44
2.6.4	Método da Norma Britânica BS 5925: 1991	48
2.6.5	Equações propostas por Silvani (2005)	53
2.7	Otimização	57
2.7.1	Otimização Aplicada ao Conforto Térmico	60
3	OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE VENTILAÇÃO NATURAL EM PAVILHÕES	63
3.1	Formulação do problema	63
3.2	Microsoft Excel Solver	66
3.2.1	Parâmetros do modelo	67
3.2.2	Opções do Solver	68
3.3	Implementação da formulação no Microsoft Excel Solver	69
4	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	71
4.1	Considerações Iniciais	71
4.2	Aplicação das formulações desenvolvidas entre os diferentes modelos teóricos	71
4.2.1	Comparação dos resultados	76
4.3	Estudo das dimensões ótimas – Aberturas	77
4.3.1	Dados dos modelos dos pavilhões	77
4.4	Resultados Obtidos	81
4.5	Análises dos resultados	92
5	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	94
5.1	Considerações Iniciais	94
5.2	Túnel de Vento	94
5.3	Anemometria de Fio Quente	97
5.4	Velocidade média do vento no ponto de referencia (Vref)	98
5.5	Velocidades adimensionais pontuais no centro das aberturas (Vadm)	99
5.6	Determinação da vazão de ar nas aberturas	99
5.7	Ensaio	100
5.7.1	Descrição do modelo	100
6	CONCLUSÕES	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento dos centros urbanos e o surgimento de novas tecnologias relacionadas à construção civil causam consequências ao meio ambiente. A preocupação com o aumento do consumo de energia para o condicionamento térmico das edificações e o bem estar dos ocupantes incentiva a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios. A otimização dos recursos energéticos através da redução dos custos com energia elétrica e seu consumo promovem alterações na forma como os edifícios são projetados, construídos e gerenciados.

A ventilação natural propicia o condicionamento térmico dos ambientes e contribui para um bom desempenho ambiental dos edifícios. A movimentação natural do ar de forma adequada contribui para a renovação do ar no ambiente, além de diminuir a temperatura interna. Este tipo de estratégia de condicionamento térmico se faz através de aberturas (janelas, portas, lanternins, entre outros), que atuam como aberturas de entrada ou saída, e devem estar posicionadas de modo a proporcionar um fluxo de ar adequado ao recinto.

A ventilação pode ser natural/espontânea ou artificial/forçada. A ventilação natural se dá pela ação dos ventos (ventilação unilateral e ventilação cruzada), já o efeito chaminé é ocasionado pela diferença de temperatura entre o ar interno e o ar externo. A ventilação artificial consiste na movimentação do ar por meios mecânicos (COSTA, 2005). Nos sistemas híbridos, os quais utilizam as duas formas de movimentação do ar, a ventilação é associada a equipamentos mecânicos, como ventiladores e condicionadores de ar, sendo possível reduzir o consumo de energia quando as condicionantes climáticas são favoráveis, sem afetar o conforto dos ocupantes.

O estudo da renovação de ar dos ambientes industriais se justifica pelas questões de conforto, higiene e saúde, e também pelos fatores relacionados aos custos e exigências de mercado, tais como: aumento de produtividade, redução do número de acidentes de trabalho, certificação das empresas, combate ao foco de incêndios, custo de energia elétrica, e outros. As edificações que utilizam a ventilação natural estão de acordo com as Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho do Ministério do Trabalho (NR), em especial a NR 8 que trata de Edificações e a NR 9 sobre o Programa de Prevenção de Riscos Ambientais, assim como com a NBR 15220:2005 sobre o Desempenho Térmico de Edificações (SILVANI, 2005).

O desempenho da ventilação envolve a forma do edifício, o entorno natural e construído, a orientação e a localização. Os fatores variáveis que norteiam a direção, a frequência, a velocidade dos ventos e as diferenças de temperatura do ar também são considerados (TRINDADE, 2006). As diretrizes construtivas que envolvem o desempenho térmico do edifício são determinadas na sua maioria de forma empírica, não abrangendo todos os fatores que fazem parte do projeto. A utilização da otimização no desempenho térmico de um ambiente é um dos objetivos mais relevantes do projeto arquitetônico (ROMERO, 2001).

As ferramentas computacionais para avaliação do desempenho da ventilação natural nas edificações são geralmente desconsideradas por projetistas devido ao custo, complexidade de uso, exigência de computadores de alta capacidade, limitações de modelagem e tempo de processamento (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

Dentre as ferramentas mais recorrentes na bibliografia, destacam-se três com diferentes níveis de incerteza e complexidade: os modelos algébricos, os modelos empíricos e as simulações em CFD. Segundo Saraiva et al. (2006) essas ferramentas podem ser associadas, utilizando dados de vento como condições de contorno para ensaios em túnel aerodinâmico, sobre modelos físicos, de área urbana ou de um edifício específico, para obter padrões de escoamento e verificar distribuições de pressão.

De acordo com Bittencourt e Cândido (2008), as técnicas algébricas simplificadas constituem um meio fácil e rápido para avaliar a intensidade da ventilação cruzada numa edificação. Os autores indicam equações para cálculo do fluxo de ar ou taxa de ventilação relacionando o coeficiente de descarga, a área de aberturas, a velocidade do vento e o coeficiente de pressão, que podem ser utilizadas para estimar a taxa de renovação de ar de um determinado ambiente, para a ventilação unilateral e cruzada.

Os modelos empíricos baseiam-se em experimentos e medições para estimar coeficientes presentes nas equações dos modelos algébricos, funcionando bem para os casos específicos dos quais são resultantes, porém, apresentam aplicabilidade reduzida.

A simulação computacional ou numérica reproduz virtualmente o túnel de vento por meio de simulação computacional de fluidos (CFD ou *Computational Fluid Dynamics*). Porém, essa ferramenta computacional para avaliação do desempenho da ventilação natural é geralmente desconsiderada por projetistas devido ao custo, complexidade de uso, exigência de computadores de alta capacidade, limitações de modelagem e tempo de processamento (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008).

Desta forma, o estudo teórico em relação aos parâmetros que envolvem a ventilação natural e a otimização se faz necessário, visto que somente a utilização de equipamentos mecânicos para a realização de trocas de ar nos ambientes muitas vezes gera desconforto aos

ocupantes (ruídos, “ar viciado”) além de que esses equipamentos utilizam os recursos energéticos, contradizendo as questões de desenvolvimento sustentável e impacto ambiental.

Neste trabalho estudam-se os parâmetros da ventilação natural com a aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento das aberturas em ambientes industriais considerando as variáveis de conforto térmico a fim de maximizar a eficiência energética. Desse modo é possível avaliar as decisões de projeto promovendo a renovação do ar e a vazão de ar necessária ao espaço construído.

A presente dissertação da continuidade a estudos desenvolvidos no Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, iniciados com o trabalho de Silvani, 2005. Integra o projeto “Otimização Energética em Pavilhões Industriais através da Ventilação Natural” desenvolvido em colaboração com o Programa de Pós-graduação em Eng. Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Apesar de direcionado a pavilhões industriais, a metodologia proposta neste trabalho pode ser empregada para edificações com diferentes finalidades, como edifícios institucionais (escolas, unidades de saúde) e residências, sendo necessária a configuração das ferramentas utilizadas conforme a tipologia escolhida.

1.2 Objetivo Geral

Estudar os parâmetros que maximizam a ventilação natural em pavilhões industriais visando um maior conforto térmico.

1.3 Objetivos específicos

1. Estudar os diferentes modelos teóricos disponíveis na literatura para a determinação da vazão de ventilação por efeito do vento e chaminé em pavilhões, bem como os parâmetros que influenciam o conforto térmico.
2. Desenvolver e implementar uma formulação matemática para a maximização da eficiência da ventilação natural.
3. Fornecer subsídios para o dimensionamento otimizado das aberturas em pavilhões.
4. Efetuar análises de modelos de pavilhões industriais buscando identificar as dimensões e disposições ótimas das aberturas, bem como sua influência para determinação da vazão de ventilação.

5. Efetuar a validação experimental através de simulação em túnel de vento.

1.4 Estrutura do trabalho

Além deste capítulo, no qual se apresenta a introdução, os objetivos e as delimitações do trabalho, a presente dissertação é composta por mais cinco capítulos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica e aprofundamentos teóricos, que compõem a base para o estudo de caso proposto. Inicialmente faz-se uma revisão bibliográfica sobre conforto ambiental, ventilação natural, seus tipos e importância para as edificações, métodos de cálculo de vazões e dimensionamento de aberturas, bem como sobre a otimização, seus métodos e aplicações.

No terceiro capítulo descreve-se a formulação do problema com os parâmetros estudados, além do software utilizado para implementação da formulação no trabalho. Nesse capítulo também é exposto como foi realizado o desenvolvimento e a escolha dos modelos.

O capítulo quarto apresenta os resultados numéricos obtidos com a implementação na planilha Excel, utilizando a ferramenta Solver, dos métodos de otimização estudados.

No capítulo quinto descrevem-se os ensaios no túnel de vento assim como se apresentam os resultados obtidos nesta etapa. São expostas as comparações entre os resultados e as discussões sobre as conclusões encontradas.

O capítulo sexto conclui a pesquisa, abordando sugestões para trabalhos futuros. Por fim, apresenta-se a relação das referências utilizadas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

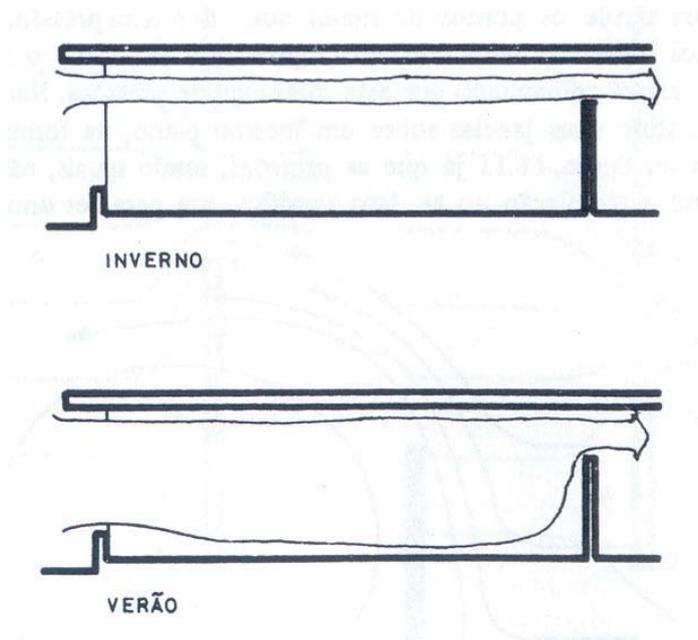
2.1 Ventilação Natural

A saúde e o conforto humano são duas importantes razões para que a ventilação nos edifícios seja analisada. A ventilação permite a renovação do ar dos ambientes, auxiliando no controle da temperatura e umidade de um ambiente, mantendo a concentração de contaminantes nos ambientes em níveis seguros tornando-os salubres, pois dispersa partículas tóxicas, como vapores, fumaça, poeira e outros poluentes (FROTA, 1989).

Para Givoni (1976), existem duas maneiras de promover o conforto através da ventilação. Uma é através do efeito direto fisiológico: ao abrir as janelas, a pessoa no interior de uma edificação sente-se refrescada, pois as altas velocidades do ar aumentam a taxa de evaporação na superfície da pele e, conseqüentemente, reforçam a sensação de resfriamento. A outra maneira é indireta, através da ventilação noturna. Ao ventilar a edificação apenas à noite, promove-se uma refrigeração da massa interna da edificação que durante o dia seguinte reduz a taxa de aumento da temperatura interna.

Nas regiões predominantemente quentes, a arquitetura tem o papel de minimizar a diferença entre as temperaturas externas e internas do ar (FROTA; SCHIFFER, 2001). Já nas regiões frias, a ventilação tem como objetivo exclusivo a higienização. Nas zonas temperadas, no inverno a ventilação tem somente a função de higienizar, contudo no verão, além de higienizar tem como função oferecer conforto térmico (RIVERO, 1985).

A ventilação natural se faz quando há deslocamento do ar dentro de um recinto fechado. O desempenho da ventilação natural está relacionado a vários fatores, entre eles: a forma do edifício, a dimensão, o tipo, o microclima onde está inserido, o número e a posição das aberturas nas edificações, seu entorno construído, bem como a velocidade do vento e diferenças de temperatura (SOUZA; MAZON, 2006). Para o bom dimensionamento da ventilação deve-se considerar o volume do ambiente, o número de pessoas e a existência de equipamentos que geram calor, como computadores, máquinas e lâmpadas. Essas características conseqüentemente influenciam na localização, tamanho e modo de abrir das aberturas. A figura 1 apresenta a ventilação própria para climas temperados, de inverno e verão (RIVERO, 1985).



Fonte: RIVERO,(1985)

Figura 1: Ventilação para climas temperados, ventilação de inverno e ventilação de verão.

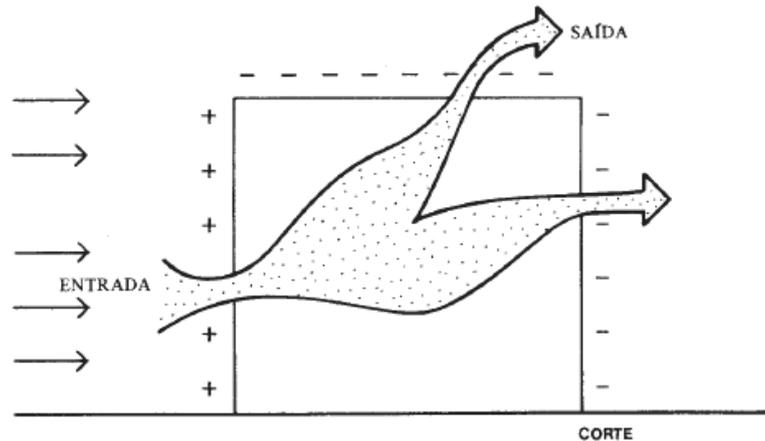
Segundo Kronka (2001), a ventilação cruzada é a solução natural e eficiente, desde que haja o dimensionamento e o posicionamento de aberturas em paredes opostas ou justapostas, ou mesmo no teto, forçando o fluxo de ar. O padrão e a velocidade do fluxo de ar não são necessariamente determinados pelo número de trocas de ar. Quando se trata de sensação térmica, além do edifício ser bem ventilado o fluxo de ar deve atingir diretamente as pessoas que ocupam o ambiente. A ventilação de conforto utiliza esse fluxo na zona de atividade do ambiente, sendo a melhor posição para entrada de ar na aberturas entre 0,5 e 1,5 m acima do piso (NEVES, 2005).

O fluxo que entra ou sai de um edifício, por ventilação natural, depende da diferença de pressão entre as partes interna e externa, como também da resistência oferecida ao fluxo pelas aberturas e equipamentos internos que podem obstruir a passagem do ar. O caminho se faz entre as aberturas, e a diferença de pressão pode ocorrer por ação do vento ou pela diferença de densidade do ar que ocorre no efeito chaminé (ALLARD, 1998; ASHRAE, 2001).

A ventilação natural pode ocorrer de duas formas: através do efeito dos ventos e pelo efeito chaminé. Entretanto, também podem ocorrer os dois mecanismos simultaneamente, dependendo das condições atmosféricas, do projeto e da localização do edifício.

2.1.1 Ventilação por ação dos ventos

A ação dos ventos causa diferença de pressão sobre os edifícios e provoca a formação de zonas expostas a pressões positivas e de zonas expostas a pressões negativas (FROTA & SCHIFFER, 2001). Há condição de ventilação do ambiente quando as aberturas de vãos em paredes sujeitas a pressões positivas possuem entrada de ar e as paredes sujeitas a pressões negativas possuem saída de ar, conforme esquematizado na figura 2.



Fonte: Frota & Schiffer, 2001

Figura 2: Ventilação por Ação dos Ventos

A distribuição destas pressões é determinada pela direção dos ventos em relação ao edifício e seu entorno, protegido por outros edifícios ou qualquer obstáculo. A pressão exercida num determinado ponto depende da velocidade do vento e do seu ângulo de incidência (FROTA & SCHIFFER, 2001).

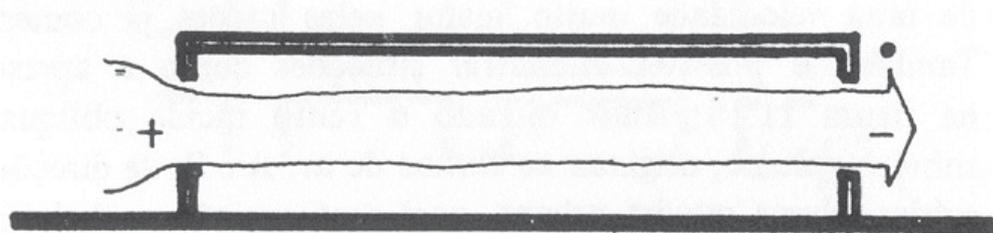
A quantidade de ar que atravessa uma abertura é calculada em função da área da abertura de entrada de ar, a velocidade do vento, a relação da dimensão das aberturas de entrada e saída de ar e o ângulo de incidência do vento sobre a abertura (CHÁVEZ E FREIXANET, 1995).

Conforme cita Givoni (1976), a diferença de pressão entre dois pontos da envoltória de um edifício determina a força potencial para a ventilação quando há aberturas nesses pontos. Com base na pressão dinâmica do vento, pode-se obter um coeficiente de pressão adimensional, válido para condições normais de temperatura. Esse coeficiente de pressão representa um modo quantitativo de se avaliar o efeito de vários fatores, como direção do vento, forma do edifício e posição das aberturas para ventilação (GIVONI, 1976).

De acordo com Lamberts (2000), a ventilação por ação dos ventos pode ser classificada como ventilação cruzada e ventilação unilateral.

-Ventilação Cruzada

A ventilação cruzada é verdadeiramente efetiva quando paredes opostas de um ambiente possuem aberturas, garantindo a entrada de ar, com pressão positiva, e a saída de ar, com pressão negativa conforme demonstrado na figura 3 (RIVERO, 1985). A ventilação cruzada é recomendada para os climas quentes úmidos e temperados, e as aberturas devem se situar em fachadas que se comuniquem diretamente com o exterior.



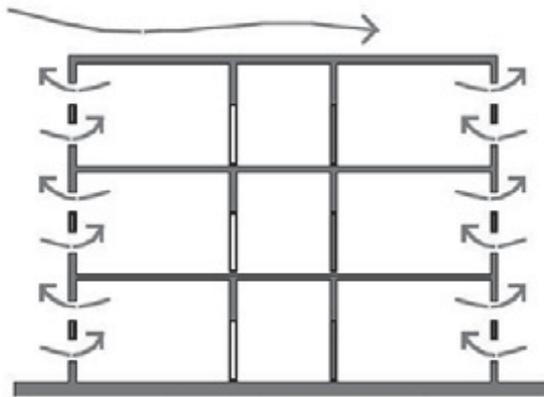
Fonte: RIVERO, (1985)

Figura 3: Pressões do ar diante da ventilação cruzada.

-Ventilação Unilateral

A ventilação unilateral é aquela que ocorre através de aberturas situadas em um único lado de um ambiente (figura 4). Esta ventilação é muito utilizada para cômodos simples, porque se caracteriza como solução de ventilação local (EMMERICH et al., 2001).

Aberturas horizontais dão mais eficiência quando a incidência do vento for a 45°, já as aberturas verticais funcionam mais adequadamente quando a incidência for a 90°, tanto na ventilação cruzada como na ventilação unilateral (CHÁVEZ E FREIXANET, 1995).



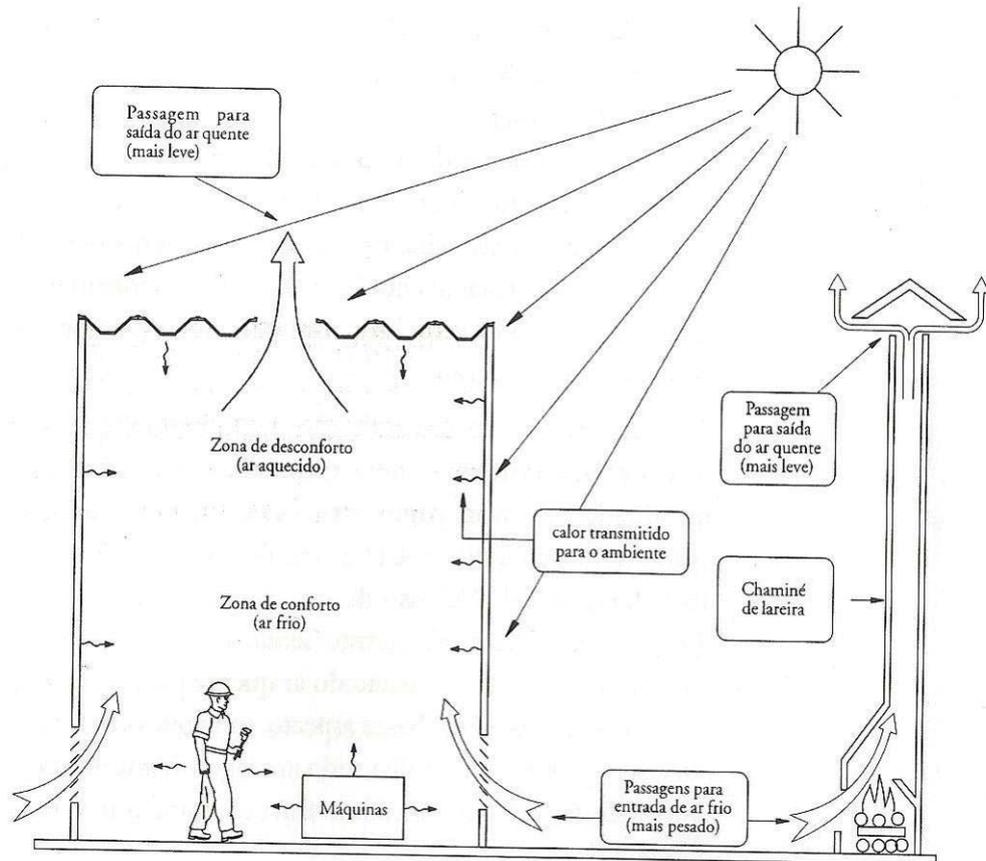
Fonte: Emmerich et al., 2001

Figura 4: Esquema de ventilação unilateral

2.1.2 Ventilação por efeito chaminé

A ventilação natural por efeito chaminé é o processo da convecção natural que se baseia no fato de o ar aquecido ser mais leve (menos denso) que o ar frio, resultando na

tendência do ar quente de subir, como ocorre nas chaminés de lareira ou churrasqueiras (SCIGLIANO & HOLLO,2001).Um pavilhão industrial possui grande área interna, permitindo uma grande exaustão do ar quente, pois ele está presente em todo a sua extensão (figura 5).



Fonte: Scigliano & Hollo (2001).

Figura 5: Efeito chaminé

Segundo Toledo (1999), a ventilação por efeito chaminé se dá quando há uma diferença de pressões originadas das diferenças de temperaturas do ar interno e externo do edifício. Assim, o ar interno, mais aquecido que o externo, sairá pelas aberturas altas, enquanto o ar externo, com temperatura inferior, entrará pelas aberturas baixas. Observa-se que o fluxo de ar será tanto mais intenso quanto mais baixas forem as aberturas de entrada e quanto mais altas forem as aberturas de saída do ar (FROTA, 2000).

A distância vertical entre as aberturas superiores e inferiores é proporcional à taxa de ventilação, pois quanto maior esta distância maior será a taxa de ventilação. Esta medida de ventilação funciona em edifícios com torres de ventilação, e/ou com pé-direito alto com aberturas localizadas na cobertura, como é o caso dos pavilhões industriais (NEVES, 2005).

2.1.3 Ventilação Industrial

De acordo com Silvani (2005), além de atender ao conforto dos ocupantes, a ventilação de edifícios industriais possui problemas com contaminantes do ar, calor dos processos de produção e poluição de gases e requer maiores taxas de ventilação.

O uso da ventilação industrial pode ser dividido em três áreas principais (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999):

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

De acordo com Emmerich et al. (2001), alguns estudos da EPA, Environmental Protection Agency, citam a qualidade interna do ar como um dos cinco principais riscos para a saúde pública. Os poluentes do ar são mais concentrados nos ambientes internos devido a permanência prolongada do homem em locais sem ventilação natural, em torno de 90% do seu tempo em ambientes internos.

De acordo com Mendell (1996) os usuários que trabalham em ambientes fechados apresentam menos sintomas de doenças respiratórias em edifícios ventilados naturalmente do que comparados aos que utilizam ventilação mecânica.

Conforme Clezar e Nogueira (1999), a ventilação pode ser classificada em dois grandes grupos:

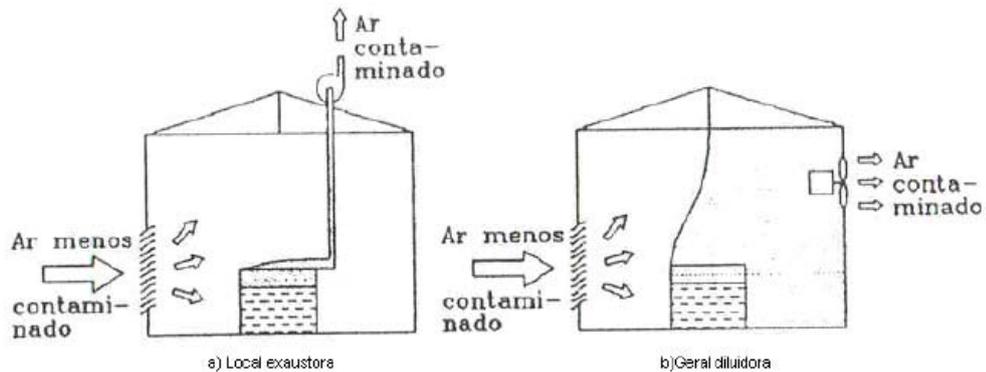
- Ventilação local exaustora (VLE): realizada por meio de um equipamento captador do contaminante no próprio local de sua formação não permitindo que se espalhe pelo recinto. É indicada para situações em que são identificados os tipos e o local das fontes geradoras de poluição.

- Ventilação geral diluidora (VGD): proporciona a ventilação de um ambiente como um todo. É adotada 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 ventilação geral diluidora pode ser utilizada para (figura 6):

- 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 podem resultar em níveis intoleráveis de umidade de ar;
- Aplicações gerais: para locais onde exista aglomeração de pessoas, tais como cinemas, teatros, bem como para locais com geração de contaminantes que oferecem pouco risco para a saúde dos ocupantes.



Fonte: Clezar e Nogueira, 1999

Figura 6: Ventilação local e ventilação geral.

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 (CLEZAR E NOGUEIRA,1999). O cálculo da vazão de ar externo necessária, Q_e , é feito segundo a finalidade da ventilação:

- Vazão de ar externo para remoção do calor sensível:

$$Q_e = \frac{q_T}{\rho_e C_p \Delta_t} \quad (1)$$

onde:

Q_e = Vazão de ar, (m^3/h);

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

q_i = taxa de geração interna de calor devida 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).

- Vazão de ar externo para remoção de umidade:

$$Q_e = \frac{G_v}{W_e \Delta W} \quad (2)$$

onde:

G_v = geração de vapor, (kg/s);

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

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

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

a) Com base no *número de trocas de ar por hora* (Tabela 1). A vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = NV \quad (3)$$

onde:

N = índice de renovação de ar por hora, ou, taxa de renovação de ar por hora, ou número de trocas de ar por hora dado pela tabela 1.

V = volume do ambiente, (m³);

Tabela 1 Trocas de ar por hora, (N)

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
Salões 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 maquinas	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
Câmaras escuras (fotografias)	10-15
Casas de carne	6-10
Restaurantes	6-10
Salas 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

Pode-se observar que, para as situações em que se deseja remover apenas os contaminantes emitidos pelos ocupantes do recinto, até oito trocas de ar por hora são

suficientes. Recomenda-se utilizar o dobro dos valores sugeridos em ambientes com grande aglomeração de pessoas fumantes (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999).

b) Com base na necessidade, *requerimento ou razão de ar por pessoa* (tabela 2), para remover odores e fumaça, a vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = Q_p N_p \quad (4)$$

onde;

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

N_p = número de pessoas.

Tabela 2 Razão de ar por pessoa.

Local	Qp em (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
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
Auditórios	25	17	Nenhum
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 Clezar e Nogueira, 1999

2.2 Conforto Térmico

As condições favoráveis de conforto térmico são aquelas que aceitam uma temperatura constante no corpo humano sem acionar os mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio e dependem de variáveis como: taxa de metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar.

De acordo com Xavier (1999), o conforto térmico é uma sensação complexa que sofre influência de fatores de ordem física, fisiológica e psicológica. Segundo ASHRAE (2001), conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Freitas (2005) salienta que o conforto térmico depende de quatro grandezas físicas principais: a temperatura e umidade do ar, as temperaturas das superfícies e a velocidade do vento. Esse conjunto de grandezas é relacionado entre si e influenciado pelos princípios da concepção arquitetônica: orientação, disposição, dimensões, materiais, entre outros.

De acordo com Silva (2001) no século IV AC, Sócrates considerava que era necessária à adequabilidade climática de residências a forma como construí-las para se assegurar conforto térmico. Vitruvius, no século I DC, também relatou a necessidade de se considerar o clima nos projetos de edificações, levando em consideração as razões de saúde e de conforto (SILVA, 2001).

Com o desenvolvimento da industrialização no século XIX, surgiram estudos que visavam à melhoria das condições de higiene e salubridade no trabalho, tendo em vista principalmente a manutenção da saúde e da produtividade do trabalhador (SILVA, 2001). O aumento da produtividade e avanços da tecnologia fizeram com que os locais de trabalho evoluíssem de pequenas oficinas para novas fábricas, com concentração de trabalhadores em um mesmo local, obtendo assim maior eficiência na produção.

No Brasil, os primeiros estudos relacionados à utilização de métodos de avaliação de conforto térmico num ambiente surgiram por volta de 1930 (OLIVEIRA & LABAKI, 2001). Este assunto se referia somente a conhecimentos internacionais, havendo a necessidade de se adaptarem os métodos utilizados internacionalmente às condições brasileiras. Neste período, dois pesquisadores brasileiros, Paulo Sá e Benjamin Alves Ribeiro, estudaram os índices de conforto térmico (OLIVEIRA & LABAKI, 2001). Eles buscaram estabelecer a relação entre a sensação térmica do brasileiro e os índices de avaliação de conforto térmico mais utilizado na época, principalmente as variáveis de temperatura do ar, velocidade e umidade do ar.

Em 1984, Aroztegui revisou os aspectos significativos do desempenho térmico, envolvendo principalmente as aberturas em edificações sem condicionamento artificial. Com isso foram elaboradas diretrizes para a avaliação do desempenho térmico de janelas para Porto Alegre, servindo de subsídio para o atual estudo do desempenho térmico.

Nos anos 90 surgiram mais estudos sobre o conforto térmico. Ressaltam-se os trabalhos da ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído), organizando encontros na área de conforto, tais como o ENCAC (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído) realizado em 1990, 1993 e 1995 e o simpósio na área de normatização para o uso racional de energia e para conforto ambiental, realizado em Florianópolis 1991 (LAMBERTS, 2000). No litoral nordestino brasileiro, Araújo (1996) avaliou o conforto térmico de edificações escolares com o objetivo principal de determinar parâmetros das variáveis ambientais que permitissem o conforto térmico confrontando-os com os índices e zonas de conforto térmico mais utilizados no país.

O estudo sobre a avaliação do conforto térmico é uma ferramenta importante a ser utilizada para melhor adequar os projetos ao clima onde serão inseridos, bem como promover subsídios que atendam às necessidades humanas. Hoje em dia esse assunto vem sendo estudado com grande interesse em diferentes partes do mundo e vários métodos são analisados para a avaliação de conforto térmico.

2.3 Índices de Conforto Térmico

Com o intuito de avaliar o efeito conjunto das variáveis de conforto térmico, alguns pesquisadores sugerem diferentes índices. De forma geral, estes índices são desenvolvidos fixando um tipo de atividade e a vestimenta do indivíduo para, a partir daí, relacionar as variáveis do ambiente e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos (LAMBERTS, 2001).

De acordo com Frota & Schiffer (2001), existem vários índices de conforto térmico, os quais podem ser divididos em dois grandes grupos: Os que estão baseados no balanço de calor (sendo o voto médio predito o mais conhecido deles) e os que têm uma abordagem adaptativa. A maioria dos índices propostos expõe que a sensação de conforto se dá quando há uma temperatura operativa, ou seja, quando há concordância da temperatura, umidade, radiação e movimento do ar. Esta sensação pode ser expressa através de índices de conforto, de cartas bioclimáticas, de gráficos psicrométricos ou monogramas de temperatura efetiva.

Os índices de conforto térmico foram classificados em três tipos conforme quadro 1:

BIOFÍSICOS	FISIOLÓGICOS	SUBJETIVOS
Baseados nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos.	Baseados nas relações fisiológicas originadas pela temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade e velocidade do ar.	Baseados nas sensações subjetivas do conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto variam.

Quadro 1 Índices de Conforto térmico

Fonte: Adaptado de Frota & Schiffer, 2001.

Existem cerca de três dezenas de índices de conforto térmico, porém, para fins de aplicação às condições ambientais, Frota e Schiffer (2001) sugerem o emprego dos seguintes:

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

A Carta Bioclimática de Olgyay — índice biofísico — foi desenvolvida a partir de estudos acerca de efeitos do clima sobre o homem, quer ele esteja abrigado quer não, de zonas de conforto e de relações entre elementos de clima e conforto. Foi construída tendo como ordenada a temperatura de bulbo seco e como abscissa a umidade relativa do ar (FROTA E SCHIFFER, 2001).

A Temperatura Efetiva, de Yaglow e Houghten, de 1923, foi definida pela correlação entre as sensações de conforto e as condições de temperatura, umidade e velocidade do ar, procurando concluir quais são as condições de conforto térmico. É um índice subjetivo. Essas correlações são apresentadas sob a forma de nomograma (FROTA E SCHIFFER, 2001).

Em 1932, Vernon e Warner apresentaram uma proposta de correção para o índice de Temperatura Efetiva, utilizando a temperatura do termômetro de globo em vez de temperatura seca do ar, para base dos cálculos, posto que a temperatura de radiação, sendo superior ou inferior à temperatura seca do ar, proporciona alterações na sensação de conforto. A zona de conforto térmico delimitada sobre o nomograma de Temperatura Efetiva para pessoas normalmente vestidas, em trabalho leve e se referindo a habitantes de regiões de climas quentes (FROTA E SCHIFFER, 2001).

Conforme citam Frota e Schiffer (2001), Webb desenvolveu o índice conforto equatorial ou índice de Cingapura, para ser aplicado a habitantes de climas tropicais, de preferência quente e úmido. Baseou-se em observações feitas em Cingapura, em habitações

correntes e em uma escala climática desenvolvida especialmente para condições tropicais, procurando correlacionar os valores dessa escala com a sensação de calor, tendo incorporado dados referentes ao P4SR (Previsão da Produção de Suor em 4 horas, que é um índice fisiológico desenvolvido por McArdle, do Royal Naval Research Establishment) e chegou a um nomograma semelhante ao da Temperatura Efetiva. Webb estende a aplicabilidade de seu índice e de seu gráfico de conforto a habitantes de regiões climáticas semelhantes a Cingapura, como, por exemplo, a Amazônia.

2.4 Aberturas: Tipologia, dimensionamento e fluxos de ar

As janelas fazem parte do envelope do edifício, cujas características, entretanto, variam, adaptando-se as funções específicas. A função básica da abertura é ser o elemento construtivo encarregado da relação interior-exterior (ARÓZTEGUI, 1984). A tipologia da abertura influencia a ventilação dos ambientes por oferecer maior ou menor resistência à passagem do ar. As aberturas permitem ou dificultam a distribuição do fluxo de ar no interior dos ambientes, assim como têm a função de proteger o edifício de chuvas, radiação solar e ruídos. Deste modo, é muito importante que o projeto das esquadrias seja analisado, pois norteia as condições de conforto de um determinado ambiente (BITTENCOURT E CÂNDIDO, 2008).

As aberturas dos edifícios industriais podem ser:

- Venezianas industriais com controle ou não de passagem de ar;
- Janelas basculantes;
- Portões e portas que permitem a passagem do ar, além da função de passagem de pessoas e equipamentos, conforme figura 7.

As esquadrias pivotantes, basculantes e dotadas de venezianas móveis possuem uma tipologia interessante, pois permitem a passagem dos ventos e o direcionamento do fluxo do ar, além da possibilidade de integração com o exterior e proteção contra a radiação solar intensa.



Fonte: Silvani,2005

Figura 7: Venezianas industriais

Alguns critérios de desempenho térmico, além da facilidade de operação pelo usuário e acessibilidade à esquadria, são determinados de acordo com o desenho das aberturas. A área real de uma abertura pode determinar a área máxima de ventilação, a possibilidade de separação das correntes de ar frio e quente, a possibilidade de ser regulável pelo usuário, a contribuição na distribuição do fluxo de ar pelo local e a estanqueidade ao ar e à chuva (MASCARÓ, 1991).

A maioria dos códigos de obras e edificações brasileiros baseia-se na fração da área de piso dos ambientes internos como critério de dimensionamento das aberturas, visando à ventilação e iluminação natural. Isso se deve basicamente à precedência dos critérios de insolação e de ventilação higiênica estabelecidos pelos Códigos anteriores à década de 1970, que ainda se baseavam em condições de higiene. Alguns Códigos de Edificações de algumas cidades brasileiras, posteriores a essa data, mostraram que a preocupação com a insolação transferiu-se, gradativamente, para a iluminação natural dos ambientes, enquanto que a ventilação natural permaneceu, na maioria das vezes, com a premissa de garantir a renovação do ar, para assegurar a qualidade do ar respirável (TOLEDO, 1999).

Esse critério de área de piso e limite máximo de profundidade do ambiente, estabelecido pelos Códigos brasileiros, por referir-se principalmente à iluminação natural lateral, não considera adequadamente as variáveis envolvidas no fenômeno da ventilação natural. Por esta razão não garante desempenho desejável para os edifícios não climatizados, sobretudo quanto ao conforto térmico dos usuários, em climas quentes e úmidos. O dimensionamento das aberturas propostos pelos códigos brasileiros, baseado nos percentuais da área de piso ou fachada pode levar a resultados equivocados, pois aberturas de mesma área, mas com formas distintas podem apresentar diferença na resistência a passagem do ar (CUNHA, 2010).

O correto dimensionamento das aberturas é a estratégia mais eficiente para definir a direção do fluxo do ar, determinando os vetores das forças que interferem na ventilação do ambiente. As aberturas influenciam significativamente no conforto do edifício através:

- Das perdas e ganhos de calor dos ambientes por meio de infiltrações de ar;
- Dos ganhos de calor solar pelos vidros e também pela própria esquadria;
- Da iluminação natural e,
- Da ventilação natural, amenizando as temperaturas internas quando possuem folhas móveis ou dispositivos que permitam a passagem do ar, como persianas, venezianas, telas, entre outros.

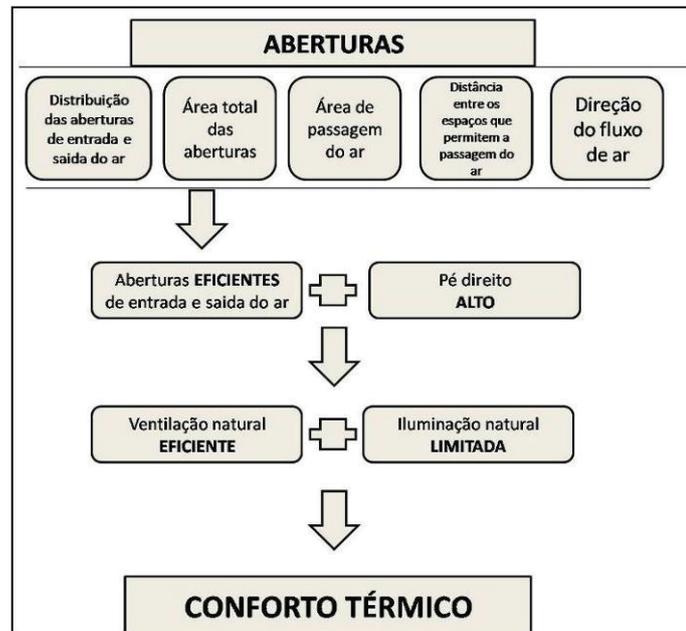
A configuração do fluxo de ar interno do edifício é determinado por três fatores principais:

- Tamanho e localização das aberturas de entrada do ar na parede;
- Tipo e configuração das esquadrias utilizadas;
- Localização de elementos próximos às aberturas, tais como divisórias internas, painéis verticais, protetores solares ou marquises.

As janelas localizadas no centro da fachada produzem taxas mais altas de ventilação do que as localizadas nas extremidades. A área de entrada de ar deve ser aproximadamente o dobro da área de saída, pois com essas condições a vazão será aumentada em torno de 25% com relação ao valor obtido em casos em que essas áreas são iguais (Clezar e Nogueira, 1999).

O aumento simultâneo das aberturas de entrada e de saída resulta em velocidades internas do ar mais elevadas. A combinação de uma entrada pequena com uma saída maior produz um movimento de ar concentrado, de maior velocidade, limitado a uma pequena seção do ambiente – o chamado “efeito Venturi”. Entradas e saídas de tamanhos similares resultam em uma ventilação mais distribuída (GIVONI, 1976).

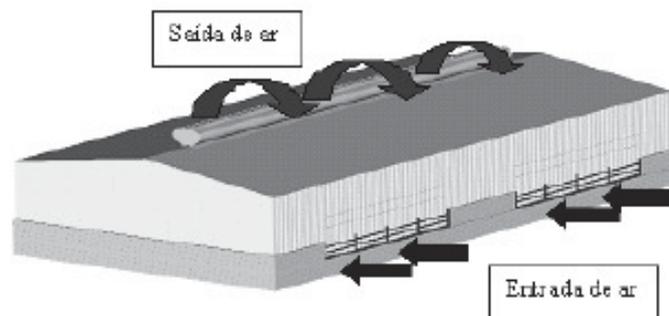
De acordo com Scigliano e Hollo (2001), alguns fatores determinantes como dimensionamento de aberturas e pé-direito influem no conforto térmico em edifícios comerciais e industriais (figura 8).



Fonte: Adaptado de Scigliano & Hollo, Vilson, 2001.

Figura 8: Fluxograma dos fatores determinantes para o conforto térmico

Conforme cita Silvani, (2005), a ventilação pode ocorrer também através de aberturas localizadas no nível do telhado, propiciando pontos de exaustão em espaços amplos e profundos que, juntamente com as janelas inferiores, proporcionam razoáveis taxas de movimento de ar nestes ambientes (Figura 9).



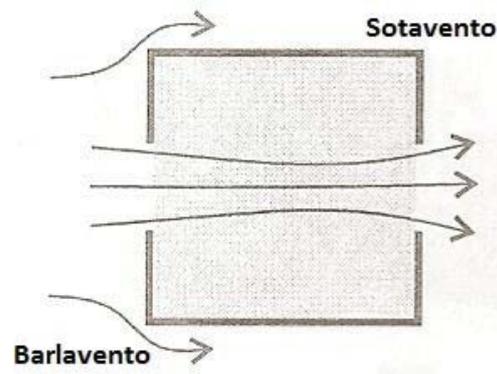
Fonte: SILVANI, 2005.

Figura 9: Pavilhão industrial com aberturas

Segundo Bittencourt e Cândido (2008), para um mesmo tamanho de abertura localizada a barlavento, maiores taxas de ventilação são obtidas quando as aberturas situadas a sotavento do edifício são maiores. Neste caso, entradas de ar maiores que as saídas reduzem o fluxo de ar, propiciando uma distribuição mais uniforme da velocidade do ar dentro do

ambiente. Conforme a distribuição das aberturas nas paredes tem-se a velocidade do ar no ambiente, demonstrado a seguir:

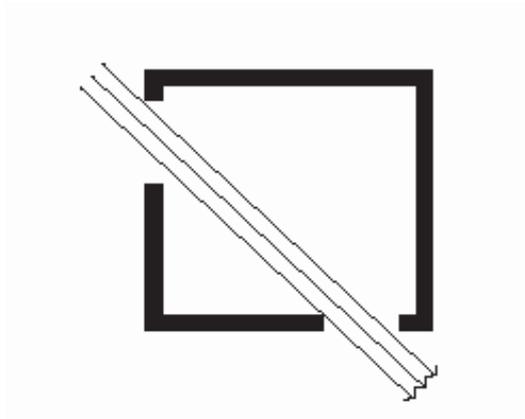
- Em paredes opostas, o ar fica numa região limitada e alcança a saída com uma velocidade mais alta (Figura 10);



Fonte: Bittencourt e Cândido, 2008.

Figura 10: Efeito do fluxo de ar.

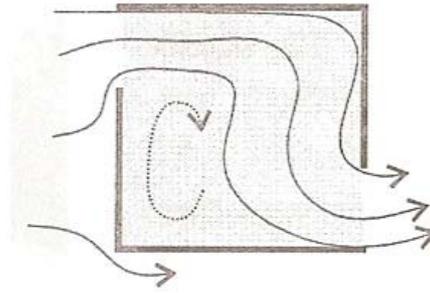
- Quando a abertura é oblíqua (Figura 11) o ar entra no ambiente e pode mudar de direção, assim sua velocidade diminui, alcançando maior volume interno e melhorando a abrangência da ventilação (GIVONI, 1976);



Fonte: Neves e Assis, 2006.

Figura 11: Efeito do fluxo de ar em aberturas oblíquas

- Quando o vento está perpendicular à abertura, a variação na direção do fluxo é ampliada, o que resulta numa melhor distribuição de ventilação por turbulência, ao contrário do fluxo oblíquo conforme ilustrado na Figura 12.



Fonte: Bittencourt e Cândido, 2008.

Figura 12: Efeito do fluxo de ar em aberturas perpendiculares.

Devido a resistências no espaço arquitetônico e seu entorno, as correntes de ar vão perdendo força. Essa diminuição na força pode ser causada por fricção, mudança de direção, expansão e perdas por resistências na entrada e saída de ar nos ambientes. As resistências de fluxo de ar encontradas nas aberturas de portas e janelas são caracterizadas por um coeficiente de descarga (BITTENCOURT E CÂNDIDO, 2008).

Na pesquisa de Cunha (2010), a comparação entre a ventilação unilateral com a ventilação cruzada demonstrou que as taxas de ventilação podem diferir de 10 a 30 vezes, sendo a ventilação cruzada muito mais eficaz. A pesquisa também abordou o impacto da combinação de três tamanhos de aberturas para um ambiente de 10 m²: abertura pequena com 1,25 m², média com 2,00 m², e grande com 4,00. As combinações de aberturas resultaram em ambientes com área total de aberturas classificadas como médias (entre 15 e 25%) e grandes (acima de 40%). Observa-se a importância das dimensões e distribuição das aberturas, sendo que a orientação em relação à incidência de vento é muito maior. Ou seja, mesmas áreas de aberturas podem apresentar desempenhos muito diferentes.

Conforme Bittencourt e Cândido (2008), o fluxo de ar (Q) através de uma abertura pode ser calculado como:

$$Q = C_D A \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (5)$$

onde:

C_D é o coeficiente de descarga;

A é a área de abertura (m²);

Δp é a diferença de pressão ao longo da abertura (Pa)

ρ é a densidade do ar (kg/m³)

O coeficiente de descarga (C_D) é uma função da diferença de temperatura, da velocidade do vento e, principalmente, da geometria da abertura. Normalmente obtido em experimentos laboratoriais, muito utilizado para determinar a perda de carga em dutos de ar condicionado. Para aberturas pequenas internas, um valor representativo é 0,65; para grandes aberturas internas, o valor pode ser próximo a 1,0, e um valor médio para uma abertura padrão é 0,78 (ALLARD, 1998). No caso de coeficientes de descarga para janelas e portas retangulares comumente adotadas em projetos arquitetônicos é geralmente utilizado um valor de 0,6 para uma abertura retangular (AYNSLEY, 1999).

A tabela 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
Abertura com bordos arredondados	0,85

Tabela 3 - Coeficientes de vazão

Fonte: Clezar e Nogueira, 1999.

Considerando o efeito chaminé, em locais onde há ventilação externa frequente, a abertura zenital pode funcionar tanto como um elemento para captar o vento ou para a exaustão do ar interno aquecido, onde a diferença de pressão entre o meio interno e externo é que indicará o sentido do fluxo de ar. A forma do elemento que cobre a abertura zenital pode ser pensada para criar uma zona de menor pressão, contribuindo para a exaustão do ar interno (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999).

Asfour e Gadi (2007) verificaram, em aberturas zenitais com cobertura semi-circular, que a direção do vento é a variável de maior influência no desempenho da ventilação. De acordo com os autores o melhor desempenho é atingido quando o ângulo de incidência é de 45° em relação ao eixo longitudinal da abertura, e o pior desempenho ocorre quando a direção do vento é paralela ao eixo.

2.5 Normas Técnicas

2.5.1 Normas Internacionais

Na maioria dos países, o objetivo principal das normas foi a conservação de energia. O principal referencial normativo referente ao conforto térmico são as normas elaboradas no

exterior pela ISO (International Organization for Standardization) e pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ambas baseadas nos estudos realizados principalmente por Fanger (1970). As normas apresentam métodos para diagnosticar as condições de conforto com base na temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar, temperatura média radiante, vestimenta do usuário e taxa metabólica do corpo humano, e não apenas com dados da temperatura do ar e na umidade relativa (ALLARD, 1998).

A normativa sobre desempenho energético global do edifício na Holanda -Dutch Energy Performance Norm- identifica opções para utilização da ventilação natural. Já a norma da Suíça exige obrigatoriamente a comprovação da necessidade para o uso de equipamentos de ar condicionado (ALLARD, 1998).

Em vigor desde 1979, a norma Norma básica NBE – CT – 79, Espanha, estabelece índices que variam conforme a zona climática onde o edifício está localizado, dentre eles estão a limitação do valor do índice de transmissão global de calor do edifício (K_g , em $W/m^2 \text{ } ^\circ C$), e ao transmissão de calor dos elementos que formam do edifício (K , em $W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Esta Norma estabelece condições muito objetivas para determinação do desempenho térmico do edifício, servindo como um guia de auxílio aos projetistas (GRILLO; AMORIM, 2004).

O Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios – (RCCTE), Portugal, está em vigor desde 1991 e tem por finalidade estabelecer os critérios destinados a promover melhores condições de conforto, higiene e salubridade dos edifícios em geral e na habitação. Os parâmetros estabelecidos nesse Regulamento estão fundamentados em prescrições que igualmente promovam o conforto térmico, sem dispêndio excessivo de energia. Com esse objetivo, são estabelecidos dois valores correspondentes às necessidades de energia por estação, para aquecimento e arrefecimento por metro quadrado de construção, por ano ($kWh/m^2 \cdot ano$) (GRILLO; AMORIM, 2004).

As Normas espanhola e portuguesa fazem restrições às características térmicas dos edifícios. Adotam metodologias distintas visando à redução do consumo energético, necessário ao conforto térmico das edificações. Ambas indicam que a redução do consumo energético decorre de características arquitetônicas e tecnologia construtiva adequadas (GRILLO; AMORIM, 2004).

O objetivo da Norma australiana AS 2047- 1999 é prover os projetistas e fabricantes de janelas de um código genérico, delimitando as exigências de desempenho e especificações para o desenho e fabricação de todas as janelas nas edificações, indiferentemente dos materiais a serem utilizados. De acordo com Grillo; Amorim (2004) considerando as

similaridades climáticas, a norma em eficiência energética australiana, Building Code of Australia - BCA poderia ser exemplo a ser seguido pelo Brasil.

As normas e regulamentos devem ser melhorados para oferecerem um maior suporte técnico e legal para os projetistas de edifícios ventilados naturalmente. Estas normas devem ainda oferecer um roteiro de cálculo simples e fácil para o cálculo da ventilação natural (COTTING, 1998).

2.5.2 Normas Brasileiras e outras legislações

No Brasil, a preocupação com o conforto térmico e desempenho térmico das edificações é recente. A questão de normalização sobre esse assunto surgiu a partir de 2005. Antes disso, o conforto térmico era discutido na NBR 6401 (1980), que estabelece parâmetros para projeto de instalações de ar condicionado com especificações relativas aos intervalos de temperatura dos ambientes e umidade relativa para pessoas em atividades sedentárias (LAMBERTS, 2000).

De acordo com a resolução RE9/03 da ANVISA, os valores recomendáveis para os parâmetros físicos de temperatura, umidade, velocidade e taxa de renovação do ar e de grau de pureza do ar, deverão estar de acordo com a NBR 6401 – Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto – Parâmetros Básicos de Projeto da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. A taxa de renovação do ar adequada de ambientes climatizados será, no mínimo, de 27 m³/hora/pessoa, exceto no caso específico de ambientes com alta rotatividade de pessoas. Nestes casos a taxa de renovação do ar mínima será de 17 m³ /hora/pessoa, não sendo admitido em qualquer situação que os ambientes possuam uma concentração de CO², maior ou igual à estabelecida pela resolução (ANVISA, 2003).

Até então, poucos trabalhos brasileiros trataram da normalização da ventilação natural dos edifícios. O documento do BNH, Banco Nacional da Habitação, elaborado pela Fundação Prefeito Faria Lima em 1981, que estabelece diretrizes gerais de desempenho dos edifícios, condições para implementação e componentes do edifício, pode ser considerado pioneiro nesta linha (TOLEDO, 1999).

A Norma Brasileira NBR 15220:2005 - Desempenho Térmico de Edificações da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) apresenta um método simplificado de avaliação do desempenho térmico de componentes construtivos. Estabelece as definições e os correspondentes símbolos e unidades dos termos relacionados com o desempenho térmico de edificações, além de métodos de cálculo das propriedades físicas dos materiais, um zoneamento bioclimático brasileiro com diretrizes construtivas para habitações, e métodos de medição da resistência e condutividade térmicas. Dividida em cinco partes (figura 13), ela

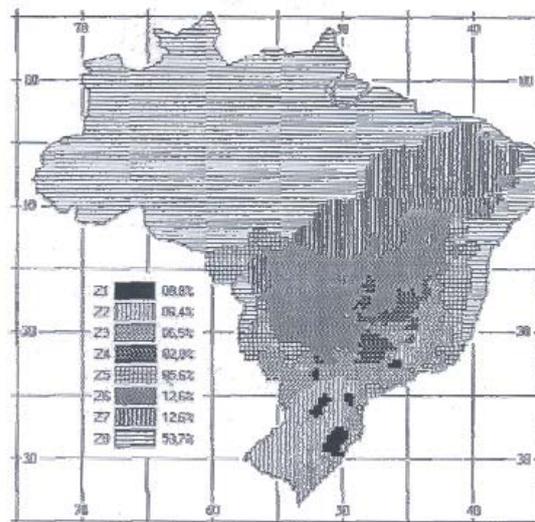
conduziu o setor da construção civil a desenvolver pesquisas sobre materiais adequados para cada tipo de clima adaptando os projetos a conceitos como fator de calor solar, ventilação cruzada e resistência térmica (LAMBERTS, 2000).



Fonte: Lamberts,2010

Figura 13: Partes da NBR 15220- Desempenho Térmico de Edificações

A ABNT adotou o zoneamento apresentado em 1999 na composição da NBR 15220-3 de 2005, estabelecendo diretrizes construtivas para cada zona, conforme apresentado na figura 14.



Fonte: NBR 15220-3 (2005)

Figura 14: Zoneamento Bioclimático brasileiro (1999)

A Norma Brasileira 15220-3 (ABNT, 2005) recomenda para a Zona Bioclimática nº 2, que compreende 6,4% do território nacional e abrange o município de Passo Fundo/ RS, o uso de ventilação por meio de aberturas voltadas para a orientação dos ventos

predominantes, com área útil entre 15% e 25% da área de piso do ambiente. A Norma indica as propriedades térmicas dos sistemas construtivos da envoltória, mas não recomenda o tipo de esquadria ou elemento vazado mais adequado, utilização de captadores de vento bem como as informações referentes a perda de carga pelo uso de venezianas, elemento que obstrui a passagem do ar. Da mesma forma, não são citados os valores pertinentes a taxa de renovação do ar e ventilação suficientes para a satisfação dos índices de conforto.

O Código de Obras de Passo Fundo, Lei Municipal nº 51/1996 (PASSO FUNDO, 1996), classifica as edificações em residenciais e não residenciais, apresentando dimensionamento mínimo de área, largura e pé-direito dos ambientes. Quanto à ventilação e iluminação, o Código de Obras recomenda que as aberturas devam estar voltadas as áreas externas à edificação, ventilando diretamente para o logradouro ou para áreas de iluminação e ventilação, dimensionadas em função do número de pavimentos que atendam. As esquadrias deverão permitir a renovação do ar, em pelo menos cinquenta por cento da área mínima exigida (0,80m²), salvo ventilação por dutos e lavabos. Com isso, estabelecem-se valores mínimos da área total dos vãos em cada compartimento. Essa fração da área do piso está mostrada na tabela 4.

PADRÕES PARA VÃOS DE VENTILAÇÃO NATURAL			
USO	TIPO DE EDIFICAÇÃO	ILUMINAÇÃO	VENTILAÇÃO
		Fração da área do piso	Fração da área do piso
RESIDENCIAL	Compartimentos principais, cozinha e lavanderia.	16 %	8%
NÃO RESIDENCIAL	Salas, escritórios, edifícios administrativos, hotéis, escolas, hospitais, clínicas, locais para refeição, etc.	16%	8%
	Lojas, pavilhões, galerias e centros comerciais, auditórios e outros locais de reunião de público.	8%	4%
RESIDENCIAIS E NÃO RESIDENCIAIS	Sanitários	-	8%
	Garagens, pequenos depósitos vinculados a outras atividades e não enquadrados na tipologia pavilhão, circulações de uso comum etc.	-	8%

Tabela 4 Tabela de dimensionamento de vãos - Código de Obras Passo Fundo - RS

Para pavilhões industriais, são recomendados 8% da área do piso para vãos de iluminação e 4% para ventilação. Com isso, para fins de projeto, as áreas dos vãos nestes ambientes deverão possuir no mínimo 4% da área do piso.

2.6 Cálculo de vazão de ar- Métodos Empíricos

Os modelos empíricos de predição da ventilação são úteis por permitir uma rápida estimativa inicial das taxas de renovação do ar e da velocidade interna, todavia a aplicação deve atentar para as limitações (ALLARD, 2002). Há centenas de modelos empíricos desenvolvidos para estimar o desempenho da ventilação. Os modelos mais simples fazem uso de equações que consideram o coeficiente de descarga da abertura, a velocidade do vento na altura de interesse, a área efetiva da abertura e os coeficientes de pressão sobre as fachadas (CHEN, 2008).

Alguns modelos empíricos, para o cálculo do fluxo de ar, são encontrados na literatura. No presente trabalho serão utilizados os métodos da ASHRAE (2001), de Frota (FROTA E SCHIFFER, 2001), de Clezar e Nogueira (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999) e da Norma Britânica BS 5925: 1991, (SILVANI, 2005). Os modelos listados são utilizados para a obtenção de uma estimativa inicial da taxa de ventilação e a velocidade média do ar, dados importantes para avaliar o desempenho térmico em uma edificação.

2.6.1 Método da ASHRAE (2001)

Quanto à ventilação por ação do vento, a ASHRAE apresenta a seguinte equação (6):

$$Q = EAV \quad (6)$$

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).

A ASHRAE (2001) recomenda o uso das fórmulas para o cálculo da vazão de ar por efeito chaminé estabelecidas por Randall e Canover (1931). Os autores desenvolveram uma equação (7) válida para edificações com duas aberturas iguais, uma localizada na parte baixa e outra na parte alta da edificação.

$$Q = 0,116A\sqrt{h\Delta t} \quad (7)$$

Sendo:

Q = vazão de ar (m^3/s);

A = área da abertura de entrada ou saída de ar (m^2);

h = distância vertical entre a abertura de entrada e de saída do ar (m);

Δt = diferença entre a temperatura do ar que sai e do ar que entra no edifício ($^{\circ}C$);

Quando as aberturas de entrada e saída não forem iguais, utiliza-se o gráfico de incremento na vazão de ar causado pelo fato de uma abertura ser maior que a outra (figura 15).

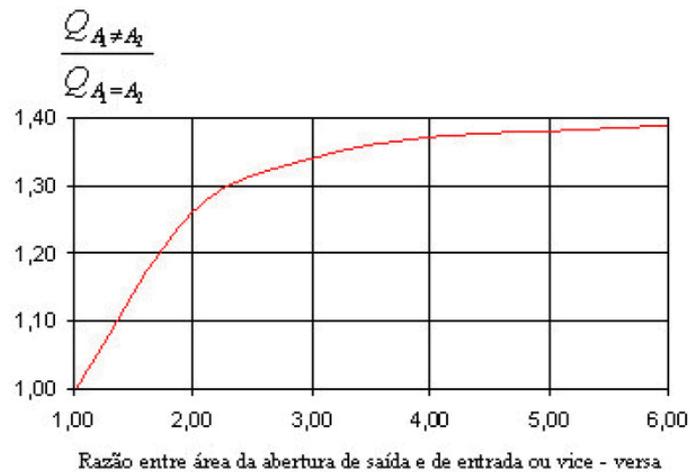


Figura 15: Gráfico de incremento de vazão de ar causado pelo fato das aberturas não serem iguais.

Para a determinação da vazão de ar, por ação simultânea do efeito chaminé e da ação do vento, ASHRAE sugere o uso da Figura 16.

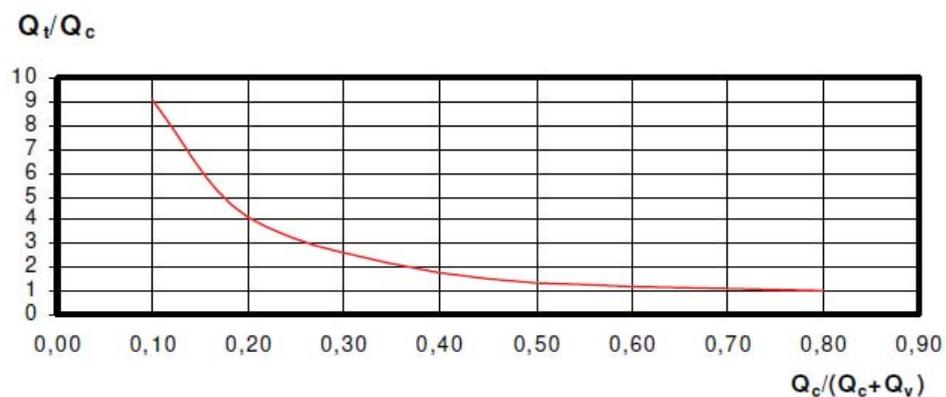


Figura 16: Gráfico para a determinação da vazão total (efeito chaminé + ação dos ventos).

2.6.2 Método de Frota (FROTA, 1989; FROTA E SCHIFFER, 2001)

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

$$Q = KA_{eq}v\sqrt{(C_e - C_s)} \quad (8)$$

onde:

Q = vazão de ar pela ação dos ventos, (m³/s);

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

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

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} , esta será função das áreas das aberturas de entrada e de saída, conforme a equação (9).

$$\frac{1}{A_o^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (9)$$

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

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

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

$$v = V \cos \theta \quad (10)$$

sendo:

V = velocidade do vento externo;

$\cos \theta$ = ângulo de incidência do vento perpendicular a fachada.

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

$$Q = K_o A \sqrt{h \Delta t} \quad (11)$$

onde:

Q = vazão de ar, (m^3/s);

A = área total da abertura de entrada ou de saída, tomada à menor, (m^2);

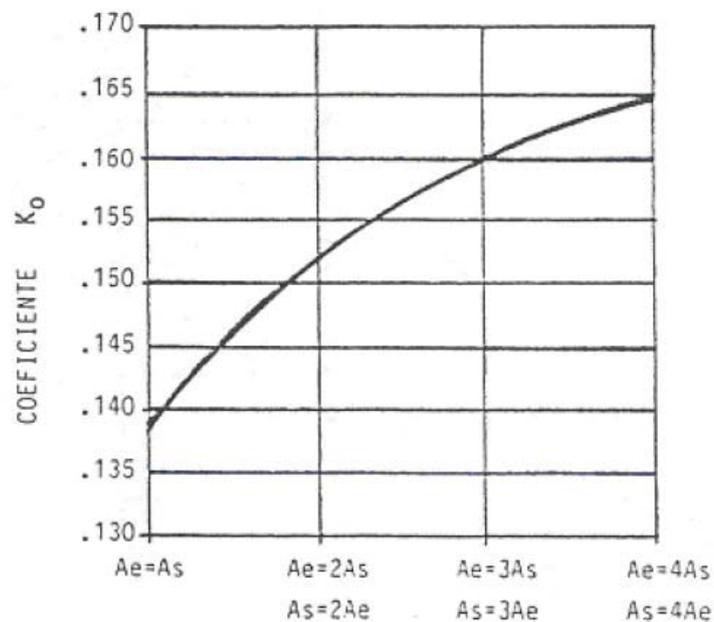
h = distância vertical entre as aberturas de entrada e de saída de ar, (m);

Δt = diferença entre a temperatura do ar que sai e do ar que entra no edifício, ($^{\circ}C$);

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 17 apresenta a variação do coeficiente K_o , segundo a relação,

$$\frac{A_e}{A_s} \text{ ou } \frac{A_s}{A_e} \quad (12)$$



Fonte: Frota, 1989

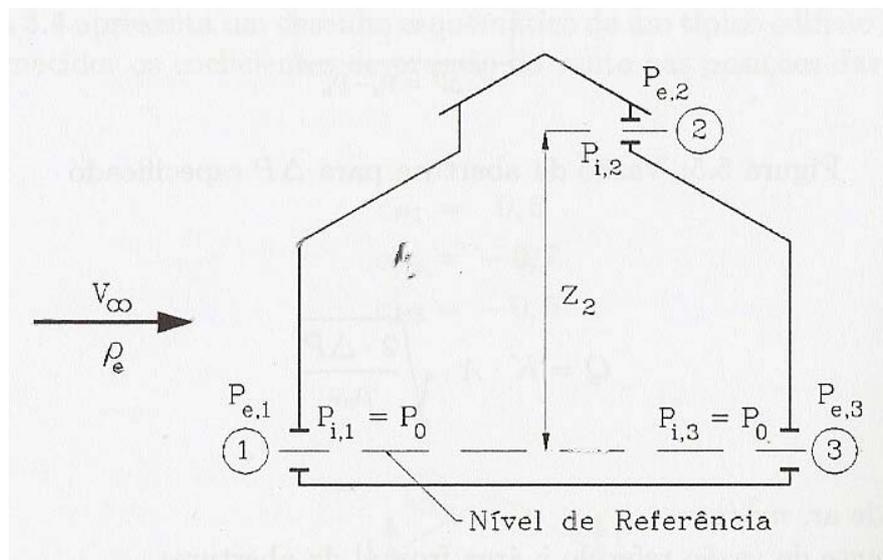
Figura 17: Curva de variação do coeficiente K_o segundo a variação da relação A_e / A_s .

Frota e Schiffer (2001), quanto à ventilação por efeito simultâneo do vento e chaminé, recomendam o emprego do gráfico da Figura 16.

2.6.3 Método de Clezar e Nogueira (CLEZAR E NOGUEIRA, 1999)

Clezar e Nogueira (1999) apresentam uma metodologia, baseada na norma ABNT 6123/87, que permite calcular a vazão de ar considerando o efeito chaminé, o efeito dos ventos, ou então, ambos os efeitos simultaneamente, através de uma formulação única. Além disso, esta formulação aplica-se a qualquer número e distribuição da aberturas.

A formulação é apresentada para o pavilhão indicado na figura 18, 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.



Fonte: Clezar e Nogueira, 1999

Figura 18: Cotas e parâmetros físicos para o ar.

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.

1. 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;

$$P_{e,j} = C_{P,j} \frac{1}{2} \rho_e V_{\infty}^2 - \rho_e g z_j \quad (13)$$

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

$$P_{i,j} = P_o - \rho_i g z_j \quad (14)$$

(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 (15), onde n representa o número total de aberturas.

$$\sum_{j=1}^n K_j A_j \sqrt{2\rho_{ar}} |\Delta p_j| \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (15)$$

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

$$\rho_{ar} = \rho_e, \text{ se } \Delta p_j > 0 \quad (16)$$

$$\rho_{ar} = \rho_i, \text{ se } \Delta p_j < 0 \quad (17)$$

(6) Calcular as vazões por:

$$Q_j = K_j A_j \sqrt{\frac{2 \cdot |\Delta p_j|}{\rho_{ar}} \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|}} = 0 \quad (18)$$

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

2. 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 da área total requerida. Considera-se também conhecida a temperatura média do ar interno, e conseqüentemente, sua massa específica. A seguir é apresentada a sequência 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 equação:

$$P_{e,j} = C_{p,j} \frac{1}{2} \rho_e V_{\infty}^2 - \rho_e g Z_j \quad (19)$$

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

$$P_{i,j} = p_o - \rho_i g Z_j \quad (20)$$

(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,

$$A_T \sum_{j=1}^n K_j \lambda_j \sqrt{2 \rho_{ar} |\Delta p_j|} \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (21)$$

Sendo:

$$\lambda_j = \frac{A_j}{A_T} \quad (22)$$

$$A_T = \sum_{j=1}^n A_j \quad (23)$$

$$\rho_{ar} = \rho_e, \quad \text{se } \Delta p_j > 0 \quad (24)$$

$$\rho_{ar} = \rho_i, \quad \text{se } \Delta p_j < 0 \quad (25)$$

Como A_T é diferente de zero, resulta:

$$\sum_{j=1}^n K_j \lambda_j \sqrt{2\rho_{ar}} |\Delta p_j| \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|} = 0 \quad (26)$$

(5) Atentando-se para o fato de que o membro esquerdo da equação (26) 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:

$$\sum_{j=1}^n K_j \cdot \lambda_j \cdot A_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{ar}} \cdot |\Delta p_j| = 2 \cdot Q_e \cdot \rho_e \quad (27)$$

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

$$A_T = \frac{A_k}{\lambda_k} \quad (28)$$

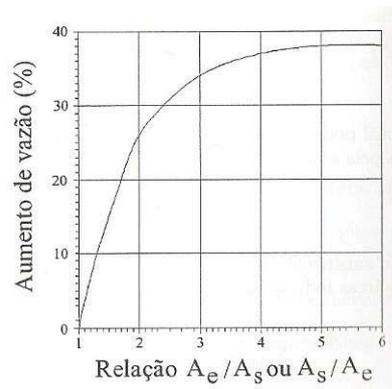
a qual, quando substituída na equação acima, permite isolar A_k , para se determinarem as áreas individuais requeridas para cada posição.

$$A_k = \frac{2Q_e \rho_e \lambda_k}{\sum_{j=1}^n K_j \lambda_j \sqrt{2\rho_{ar}} |\Delta p_j|} \quad (29)$$

Clezar e Nogueira (1999) citam algumas regras gerais para melhor aproveitamento da ventilação natural, obtendo o máximo de eficiência:

- Evitar projetos de pavilhões com grandes vãos entre as paredes que contém as aberturas de entrada de ar, pois, no caso de grandes vãos, a ventilação da região central poderá ficar prejudicada por curto circuito entre aberturas de entradas e saídas do ar.
- Maximizar as distâncias verticais entre as aberturas de ventilação, para tirar maior proveito da ação da diferença de temperatura.
- Orientar o prédio de maneira conveniente, para otimizar a ação dos ventos predominantes.
- Proteger da ação contrária dos ventos, por meio de anteparos, as aberturas de saída do ar.
- Recomendam que a área de entrada, A_e , seja aproximadamente o dobro da área de saída, A_s , pois nessas condições a vazão será aumentada em cerca de 25% em relação ao valor obtido para $A_e \approx A_s$, como demonstrado na figura 19. Este procedimento garante a manutenção da vazão desejada, mesmo nos dias mais desfavoráveis, quando parte das

aberturas de entrada poderá estar em depressão, devido a ação do vento ser diferente daquela adotada no projeto



Fonte: Clezar e Nogueira, 1999.

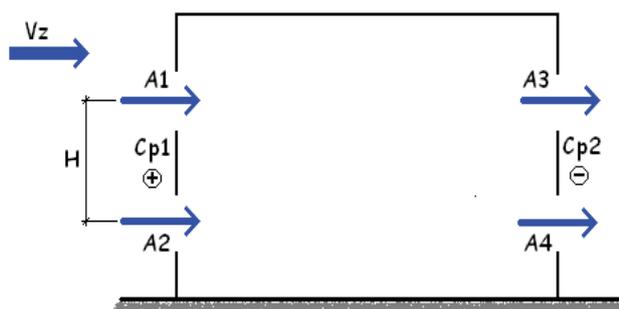
Figura 19: Efeito de aberturas desiguais

2.6.4 Método da Norma Britânica BS 5925: 1991

O método apresentado na norma Britânica BS 5925: 1991 propõe fórmulas para o cálculo do fluxo de ar para a ventilação por ação dos ventos e para a ventilação por ação da diferença de temperatura (efeito chaminé) além do efeito combinado de ambos, tanto por aberturas em paredes opostas (ventilação cruzada) como para paredes de um único lado (ventilação unilateral). O método assume um fluxo bidirecional através do edifício e ignora todas as divisões internas (RODRIGUES, 2008).

- Ventilação Cruzada- Ação dos Ventos

Considerando somente a ação do vento na figura 20:



Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 20: Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada

A vazão de ar é dada por:

$$Q_w = C_d A_w v_z \sqrt{\Delta C_p} \quad (30)$$

onde,

Q_w : vazão de ar pela ação dos ventos (m^3/s)

C_d : coeficiente de descarga referente à perda de carga por ação dos ventos ($\approx 0,61$)

A_w : área equivalente das aberturas (m^2)

v_z : velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s)

ΔC_p : variação dos coeficientes de pressão $\Delta C_p = C_{p1} - C_{p2}$,

C_{p1} : coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar,

C_{p2} : coeficiente de pressão da abertura de saída de ar.

No que se refere A_w , ou seja, a área equivalente das aberturas, esta função das áreas das aberturas de entrada e de saída do ar, dentro da seguinte relação:

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(\sum A_{entrada})^2} + \frac{1}{(\sum A_{saída})^2} \quad (31)$$

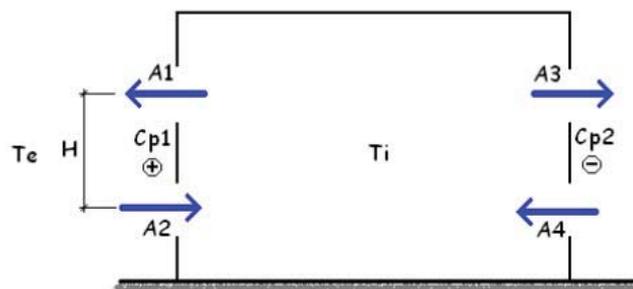
Essa formulação, resulta:

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad (32)$$

Nos casos de espaços com pé-direito mais elevado que possam incluir mais do que uma abertura na fachada, considera-se que os coeficientes de descarga são iguais nas duas aberturas.

- Ventilação cruzada- Diferença de temperatura

Considerando a ação somente da diferença de temperatura, figura 21:



Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 21: Ventilação cruzada devida ação da diferença de temperatura com duas aberturas por fachada

A vazão de ar é dada por:

$$Q_b = C_d A_b \sqrt{\frac{2\Delta T g H}{T_e}} \quad (33)$$

onde,

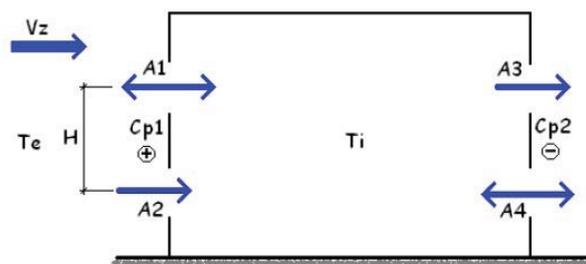
- Q_b : vazão de ar pela ação da temperatura (m^3/s)
- C_d : coeficiente de descarga referente à perda de carga (0,6),
- T_e : temperatura externa (K),
- T_i : temperatura interna (K),
- ΔT : variação de temperatura $\Delta T = T_i - T_e$
- T : temperatura média $T = (T_i + T_e)/2$
- g : aceleração da gravidade ($9,81 m/s^2$),
- H : altura entre duas aberturas verticais (m)

A_b : área equivalente das aberturas (m^2), especificada na equação a seguir:

$$\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2} \quad (34)$$

- Ventilação cruzada- Efeitos combinados

Considerando o efeito combinado de vento e diferença de temperatura (Figura 22), tem-se:



Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 22: Ventilação cruzada devida ação combinada dos ventos e da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada

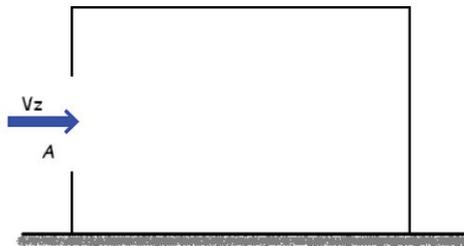
$$Q = Q_b \text{ para } \frac{v_z}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w}} \sqrt{\frac{H}{\Delta C_p}} \quad (35)$$

$$Q = Q_w \text{ para } \frac{v_z}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w}} \sqrt{\frac{H}{\Delta C_p}} \quad (36)$$

- Ventilação unilateral

A ventilação unilateral principalmente com uma única abertura (Figura 23) pode ser aplicada, por exemplo, a escritórios ou a pequenos espaços comerciais em que a profundidade do espaço é reduzida.

A vazão de ar, admitindo somente a ação dos ventos, pode ser dada por:



Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 23: Ventilação unilateral devida à ação dos ventos em uma única abertura

$$Q_w = 0,025 A v_z \quad (37)$$

onde,

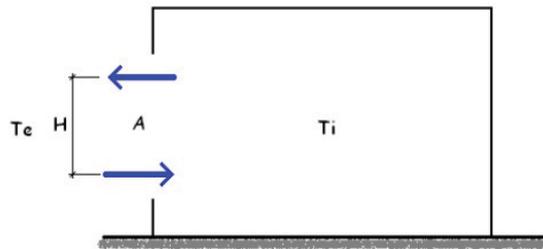
A: área da abertura (m²),

v_z : velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s).

Neste método não existe uma equação correspondente para ventilação por ação dos ventos para duas aberturas por fachada, mas segundo Allocca et al (2003) em sua pesquisa o coeficiente 0,025 pode ser aumentado para 0,1 para configuração de duas aberturas. Este

aumento no coeficiente aumentaria efetivamente a ventilação por ação dos ventos por cerca de duas vezes.

- Considerando somente diferença de temperatura, figura 24:

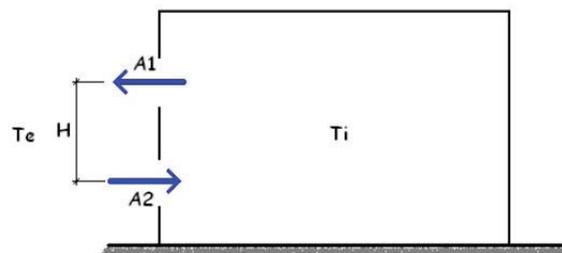


Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 24: Ventilação unilateral devida ação da diferença de temperatura em uma única abertura

$$Q_b = C_d \frac{A}{3} \sqrt{\frac{\Delta T g H}{\bar{T}}} \quad (38)$$

- Considerando somente diferença de temperatura com duas aberturas: (Figura 25)



Fonte: Rodrigues, 2008

Figura 25: Ventilação unilateral devida à ação da temperatura em duas aberturas

$$Q_b = C_d A \left[\sqrt{2 \frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)\sqrt{1+\varepsilon^2}}} \right] \sqrt{\frac{\Delta T g H}{\bar{T}}} \quad (39)$$

Onde , $\varepsilon = A_1/A_2$ e $A = A_1 + A_2$

Para os casos de efeito combinado de vento e diferença de temperatura pode-se utilizar a seguinte equação:

$$Q = \sqrt{(Q_w)^2 + (Q_b)^2} \quad (40)$$

2.6.5 Equações propostas por Silvani (2005)

Silvani (2005) propõe para a determinação da vazão de ar nas aberturas de entrada, por efeito chaminé, por efeito do vento e ambos simultaneamente as seguintes equações:

- Efeito chaminé:

Para a determinação da vazão de ar nas aberturas por efeito chaminé considerando o coeficiente de descarga das aberturas $k = 0,61$, têm-se:

$$Q = k\sqrt{gA_e} \sqrt{h} \frac{\Delta T}{T} = 0,61\sqrt{9,81A_e} \sqrt{h} \frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)} \quad (41)$$

Considerando o incremento de vazão devido às aberturas de entrada ser diferente das aberturas de saída de ar na equação (38), têm-se:

$$Q_{e,c} = 1,91 A_e \sqrt{h \frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)}} \sqrt{\frac{2A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}} \quad (42)$$

onde:

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);

- Efeito do vento:

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

$$Q_{e,v} = KVA \sqrt{cpe_e - cpe_s} = 0,61VA \sqrt{cpe_e - cpe_s} \quad (43)$$

Considerando o incremento de vazão devido às aberturas de entrada serem diferentes das aberturas de saída de ar na equação (44), têm-se:

$$Q_{e,v} = 0,61V \sqrt{cpe_e - cpe_s} \sqrt{\frac{A_e^2 A_s^2}{A_e^2 + A_s^2}} \quad (44)$$

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.

- Ambos os efeitos simultâneos:

$$Q_{e,T} = Q_{e,c} \sqrt{1 + \left(\frac{Q_{e,v}}{Q_{e,c}}\right)^2} \quad (45)$$

Observar que na aplicação das equações (42) e (44), 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:

$$A = \frac{Q_e}{1,91 \sqrt{h \frac{\Delta t_{avg}}{(t_e + 273)}}} \quad (46)$$

Com Q_e calculada pela equação:

$$Q_e = \frac{q_T}{\rho_e C_p \Delta t} = \frac{q_T}{1,2 \cdot 0,24 \Delta t} = \frac{q_T}{0,29 \Delta t_{avg}} \quad (47)$$

onde:

q_T = carga térmica em (kcal/h);

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

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

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

No quadro 2 são descritos em síntese os métodos analisados. Em geral, possuem as características das aberturas bem próximas, pois consideram as áreas de entrada e saída, podendo ser iguais ou diferentes. Como embasamento para o cálculo da vazão, são considerados os efeitos da ação dos ventos, efeito chaminé e ambos simultaneamente, ficando somente com os efeitos separados o método descrito por ASHRAE (2001).

As equações descritas por SILVANI (2005) empregam os dados da carga térmica do edifício e as diferenças dos coeficientes de pressão nas aberturas, encontrados na NBR-6123.

METODOLOGIA	CARACTERÍSTICAS DAS ABERTURAS	PROCESSOS CONSIDERADOS	FATORES DE CORREÇÃO E REDUÇÃO
1989); FROTA E SCHIFFER (2001)	Áreas de Entrada e Saídas iguais ou diferentes	Ação do vento; Diferenças de temperatura do ar ou pelos dois processos combinados	Coeficientes de Perda de Carga das aberturas. Diferenças de Coeficiente de Pressão nas aberturas; Velocidade do vento externo
NORMA BRITÂNICA (1991)	Áreas de Entrada e Saída diferentes; única fachada ou oposta	Ação do vento; Diferenças de temperatura do ar ou pelos dois processos combinados	Diferenças de Coeficiente de Pressão nas aberturas; Coeficientes de Perda de Carga das aberturas. Diferença de altura entre as aberturas.
CLEZAR E NOGUEIRA (1999)	Áreas de Entrada e Saídas iguais ou diferentes	Ação do vento; Diferenças de temperatura do ar ou pelos dois processos combinados	Calculo da vazão das aberturas Calculo das áreas individuais das aberturas
ASHRAE (2001)	Áreas de Entrada e Saídas iguais ou diferentes	Ação do vento ou por diferenças de temperatura do ar	Efetividade das Aberturas; Razão entre as aberturas; Diferença de altura entre as aberturas
SILVANI (2005)	Áreas de Entrada e Saídas iguais ou diferentes	Ação do vento; Diferenças de temperatura do ar ou pelos dois processos combinados	Coeficientes de Perda de Carga das aberturas. Diferenças de Coeficiente de Pressão nas aberturas; Diferença de altura entre as aberturas Carga térmica do edifício

Quadro 2 Características dos métodos analisados

2.7 Otimização

Otimização é a área da Matemática Aplicada que se preocupa em calcular e computar valores ótimos para variáveis de decisão que induzem desempenho ótimo, de um modelo matemático ao mesmo tempo em que satisfazem restrições. (CAMPONOGARA, 2006).

Os métodos de otimização são utilizados quando se pretende minimizar ou maximizar uma função. Os algoritmos procuram chegar a valores “ótimos” de forma diferenciada em problemas nos quais o cálculo analítico seria impraticável. De um modo geral, todos se utilizam de iterações, comparando os valores das soluções anteriores com as novas e através de algumas regras de decisão, escolhendo qual “direção” seguir.

As técnicas numéricas de otimização foram introduzidas na Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de operações logísticas militares. Nessa época, o professor George B. Dantzig, um dos pioneiros nessa ciência, trabalhava para a força aérea dos Estados Unidos com a finalidade de resolver problemas de alocação de aeronaves para o transporte de suprimentos. Foi em 1947 que Dantzig desenvolveu o método Simplex para a resolução de problemas de Programação linear (ROSAL, 2007).

A otimização permite que um determinado problema seja representado, de forma adequada, por meio de um modelo matemático, satisfazendo restrições específicas. Modelos matemáticos representam complexos sistemas físicos que dependem de soluções e recursos computacionais para a sua resolução. Há um grande interesse no desenvolvimento e implementação destes modelos em todas as áreas do conhecimento (engenharia, física, matemática, agronomia, economia, etc.), tanto para que haja economia de materiais e/ou tempo quanto para o aumento da produtividade ou lucratividade dos recursos.

Os modelos de programação matemática trabalham com processos de decisão e são compostos por uma função objetivo e por determinadas restrições, relacionadas a um conjunto de variáveis, descritas através de um conjunto de equações e inequações algébricas.

Os processos de otimização são influenciados por um fator e suas combinações, na tentativa de produzir um melhor resultado. São divididos em etapas, caracterizadas por decisões sobre a função a ser observada, pela determinação dos fatores que influenciam significativamente a resposta e, por fim, pela otimização propriamente dita das variáveis selecionadas (EIRAS; ANDRADE, 1996).

Um problema de otimização geralmente é composto de três elementos constituintes:

- Variáveis de Decisão: Parâmetros cujos valores definem uma solução para o problema. Esses parâmetros podem definir as quantidades produzidas e os recursos utilizados.

- Função Objetivo: Uma função das variáveis de decisão a ser minimizada ou maximizada. É possível minimizar custos, reduzir o número de homens-hora e aumentar a produtividade.

- Restrições: Um conjunto de funções de igualdade ou desigualdade, que representam os limites que devem ser atendidos no projeto. As restrições estabelecem limites para os recursos utilizados, restrições operacionais do processo de produção, bem como limitações físicas e tecnológicas.

O problema geral de otimização pode ser expresso em programação matemática como:

Minimizar ou maximizar $f(x)$

Sujeito a:

$$g(x) \leq 0$$

$$h(x) = 0$$

$$x \in R^n$$

onde: $f : R_n \rightarrow R$ é a função objetivo; $g : R_n \rightarrow R_p$ e $h : R_n \rightarrow R_q$ são restrições que limitam o espaço de soluções factíveis; e x é o vetor com as variáveis de decisão.

Além destes elementos, alguns termos usualmente relacionados a um problema de otimização:

- Ponto ótimo: É o ponto formado pelas variáveis de projeto que satisfazem as restrições.
- Valor ótimo: É o valor da função objetivo $f(x)$ no ponto ótimo.
- Solução ótima: É o par formado pelo ponto ótimo e valor ótimo $[x, f(x)]$. A solução ótima pode ser: local, global, restringida e não restringida.

Os métodos para solução de problemas de otimização podem ser divididos em quatro grupos:

-Métodos analíticos: Os métodos analíticos, de um modo geral, permitem somente a solução de problemas simples de otimização. Porém, permitem analisar conceitos importantes da otimização, como existência ou condições necessárias e suficientes da solução ótima, bem como validar a solução de métodos numéricos que são aplicados em problemas genéricos.

-Métodos numéricos: Os algoritmos numéricos para solução de problemas de otimização são essencialmente classificados em "métodos de programação matemática" e "métodos probabilísticos". Entre os métodos probabilísticos mais conhecidos têm-se os

Algoritmos Genéticos e o *Simulated Annealing* (SILVA, 2006). A diferença entre estes métodos é a forma de encontrar o ótimo global do problema de otimização. Os métodos probabilísticos evitam os ótimos locais, ao passo que os métodos de programação matemática fornecem um ótimo local.

-Métodos gráficos: Muito úteis para representação dos conceitos de otimização, estes métodos obtêm as soluções por meio da construção de gráficos da função objetivo, restrições e domínio viável, permitindo até duas variáveis de projeto para a solução de problemas de otimização.

- Métodos clássicos: Os métodos matemáticos geralmente apresentam teoremas que lhes garantem a convergência para uma solução ótima. Entretanto, essa solução não será necessariamente a solução ótima global, o que pode, eventualmente, até ocorrer. Em geral, este fato dependerá do ponto de partida fornecido para o método utilizado, problema que tem sido abordado há muito tempo pelos pesquisadores, mas para o qual ainda não se obteve uma solução.

A partir das características da função objetivo e das restrições, classificam-se os problemas de otimização em lineares e não-lineares:

- Programação Linear: quando a função objetivo e as restrições são funções lineares das variáveis de projeto;

- Programação Não-Linear: quando a função objetivo ou pelo menos uma das restrições é função não-linear das variáveis de projeto.

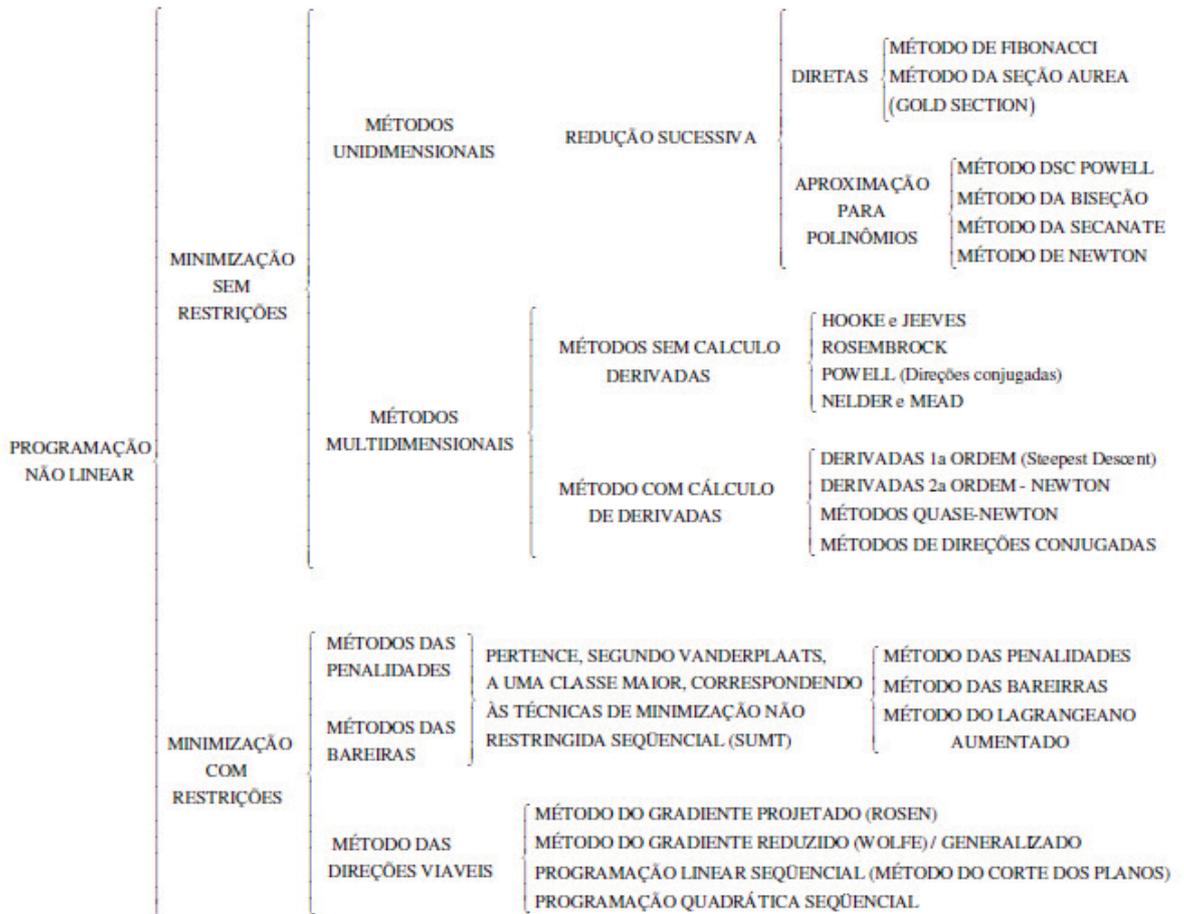
Posteriormente, outras subáreas foram aparecendo com o objetivo de maior especialização nos problemas a serem resolvidos. Dentre essas se tem a programação quadrática, na qual a função objetivo é quadrática e as restrições são funções lineares das variáveis de projeto.

Uma extensão da programação matemática seria a programação multi-objetivo, que trata o problema de otimização de maneira diferente da anteriormente apresentada, ou seja, têm-se várias funções objetivo a serem otimizadas simultaneamente.

Embora um problema de otimização clássico possa ser resolvido pela programação multi-objetivo, deve-se destacar que as metodologias, conceitos e idéias são diferentes entre as duas abordagens. Os métodos utilizados para a resolução dos problemas de otimização possuem as classificações definidas por diversos autores da literatura.

De acordo com Neves (1997), uma das classificações dos métodos possíveis é a ilustrada na figura 26:

PROGRAMAÇÃO LINEAR → MÉTODO SIMPLEX



Fonte: NEVES (1997).

Figura 26: Classificação dos métodos clássicos.

2.7.1 Otimização Aplicada ao Conforto Térmico

O estudo da aplicação da otimização nas análises do desempenho térmico foi abordado principalmente por autores internacionais que, de forma geral, descrevem os métodos numéricos e as variáveis de projeto determinando as condições de conforto térmico. Algumas das pesquisas mais recentes encontradas sobre a otimização aplicada ao conforto térmico são citadas a seguir.

O método descrito por Bouchlaghem (1990) simula o desempenho térmico do edifício, e aplica técnicas de otimização para determinar as melhores variáveis de projeto e condições de conforto térmico. São consideradas as variáveis de projeto relacionadas à tipologia de edifícios, à orientação solar e à relação das aberturas, entre outros. O método permite encontrar as soluções de projeto que proporcionem o melhor desempenho térmico.

São investigadas, seis funções objetivo que representam as formas de quantificar o conforto térmico. Além disso, as variáveis de decisão são sujeitas a restrições lineares. O problema de otimização com restrição é resolvido usando uma combinação do Método de busca Simplex, desenvolvido por Nelder e Mead (1965).

Caldas e Norford (2002) descrevem um método para encontrar as dimensões das janelas (largura e altura) que resultam num edifício com pequena quantidade de energia necessária para aquecimento e iluminação artificial. A otimização é baseada nos resultados de um software de simulação detalhada (Energy Plus). O software ajusta automaticamente a quantidade de iluminação artificial, de tal forma que a iluminação desejada seja alcançada. Isso resulta em um problema de otimização irrestrita que é resolvido usando um algoritmo genético.

O método descrito por Jedrzejuk e Marks (2002) decompõe o problema de projeto nos seguintes subproblemas: otimização de espaços internos, tipologia da construção e, finalmente, a coordenação das soluções. A forma do edifício está representada por meio de parâmetros como a altura das paredes, o número de pisos, a equivalência dos vãos da janela para com as áreas de parede, entre outros. O método é baseado em uma formulação multi-critério restrito, que utiliza os custos da construção, a posição solar, a energia e a poluição emitida pelas fontes de calor, como funções objetivo. Este problema de otimização é resolvido utilizando uma combinação de métodos analíticos e numéricos.

O estudo considera algumas variáveis de decisão para que o desempenho térmico dos edifícios seja satisfatório, dentre elas citam-se: a forma e orientação do edifício, a área da cobertura, as áreas de janela em relação à área das paredes externas, os tipos e formas das janelas e o projeto e operação de sistemas de climatização. Essas variáveis são, portanto, adequadas para a otimização do desempenho térmico. As seguintes medidas de desempenho (entre outros) são consideradas: a quantidade de energia necessária para aquecimento, arrefecimento e ventilação do edifício, bem como a energia para a água quente para uso doméstico e de energia para iluminação artificial; o nível de conforto térmico; o nível de utilização da luz natural; o número de horas com o superaquecimento; o custo de construção do edifício; o custo de operação do edifício; o custo do ciclo de vida do edifício e o impacto ambiental do edifício.

Stephan (2009) desenvolveu um modelo computacional baseado na dinâmica dos fluidos com o objetivo de otimizar as taxas de ventilação natural, variando as dimensões das aberturas nas construções utilizando o software GenOpt. O autor calculou a altura da abertura a fim de otimizar tanto a taxa de fluxo de ar quanto o conforto térmico dos

ocupantes. A função objetiva da formulação teve base nos critérios de conforto em relação ao clima do lugar, determinando assim as alturas das aberturas de acordo com a ventilação encontrada. O método de Stephan (2009) tem a vantagem de reduzir drasticamente o número de variáveis independentes. Com o método é possível desenvolver um novo sistema de controle capaz de variar a seção de aberturas para obter a vazão necessária de ar especialmente para edifícios com inércia térmica elevada.

Trindade et al, (2010) investigaram formas de prever o comportamento da ventilação natural em edifícios através de ferramentas de simulação computacional, visando apoiar a tomada de decisão no projeto de arquitetura. Utilizaram um programa computacional de dinâmica de fluidos e um de simulação térmica e energética de edificações aplicada em galpões industriais. O artigo tem como foco a discussão dos procedimentos necessários para viabilizar as análises da ventilação, indicando como o método teve de ser adequado à complexidade de sucessivas abordagens, resultando em simplificações e incertezas de resultados.

O uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto se consolida acessível apenas a grupos de pesquisa de pequenos e médios portes. Esses programas ainda são praticamente desconhecidos da maioria dos projetistas atuantes no Brasil, uma vez que requerem para seu uso conhecimentos pouco difundidos na formação de arquitetos. Em países desenvolvidos, os grandes escritórios têm maiores possibilidades de uso dessas ferramentas, pois conseguem envolver equipes multidisciplinares para projetos de grande porte, ao contrário dos pequenos escritórios (PEDRINI; SZOKOLAY, 2005).

Entre os programas de simulação voltados à edificação destacam-se os de desempenho térmico e energético, bem como os de predição da ventilação, baseados na dinâmica dos fluidos computacional. As ferramentas de simulação da ventilação estão entre os programas mais complexos de operação, uma vez que exigem conhecimentos de mecânica de fluidos e de solução numérica de equações diferenciais. Augenbroe (2001) e Maliska (2001) defendem uma melhoria na interface dos programas de CFD para que os arquitetos possam ser incluídos entre os usuários dessas ferramentas, incorporando-as ao processo projetual. No entanto, no estágio atual em que se encontra a simulação computacional, freqüentemente é necessária uma equipe multidisciplinar para viabilizar seu uso. Ainda assim, o alto custo de consultoria restringe sua difusão (PEDRINI, 2003).

3 OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE VENTILAÇÃO NATURAL EM PAVILHÕES

De acordo com o referencial teórico apresentado, 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. Assim, as características da ventilação natural foram descritas nos métodos aproximados a fim de aperfeiçoar as áreas das aberturas e atender aos requisitos de vazão mínima e parâmetros descritos pelos autores estudados.

3.1 Formulação do problema

O dimensionamento das aberturas visa fornecer área suficiente para satisfazer as necessidades de ar dos usuários. Neste sentido, o objetivo consiste em minimizar a área mínima das aberturas proporcionando a vazão necessária para o conforto térmico do pavilhão industrial, ou em outras palavras determinar as áreas mínimas das aberturas. Com isso foi necessária a adição de algumas restrições. Considerou-se como critério principal o somatório das áreas das aberturas permitindo que a vazão necessária seja atendida, sendo esta menor ou igual à vazão a ser calculada.

A vazão de ar necessária deste problema é um dado fixo. Foram consideradas como variáveis no problema, ilustrado na figura 27, a altura do peitoril e da abertura tanto inferior quanto superior considerando os efeitos do vento e chaminé. Com a determinação da dimensão “altura” das aberturas, é calculada a área da abertura e com a dimensão “altura” dos peitoris é possível calcular a distância entre as aberturas.

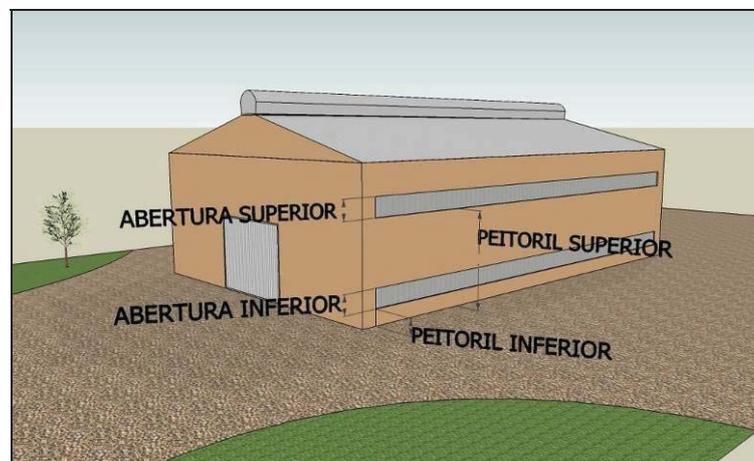


Figura 27: Pavilhão industrial com variáveis

Como diretriz de projeto, para que haja coerência nas dimensões das fachadas, o peitoril mínimo também consiste num parâmetro fixo.



Figura 28: Pavilhão industrial indicando peitoril mínimo

As restrições das alturas são delimitadas da seguinte forma:

- Os somatórios das dimensões de peitoril e altura das aberturas superiores devem ser menores que a altura do pé direito do pavilhão (figura 29).

$$P_s + A_s < P_d \quad (48)$$

onde:

P_s = peitoril superior

A_s = abertura superior

P_d = pé direito



Figura 29: Pavilhão industrial com restrição

- O somatório das dimensões do peitoril e altura das aberturas inferiores não deve ultrapassar o peitoril da abertura superior (figura 30).

$$P_i + A_i < P_s \quad (49)$$

onde:

P_i = peitoril inferior

A_i = abertura inferior

P_s = peitoril superior

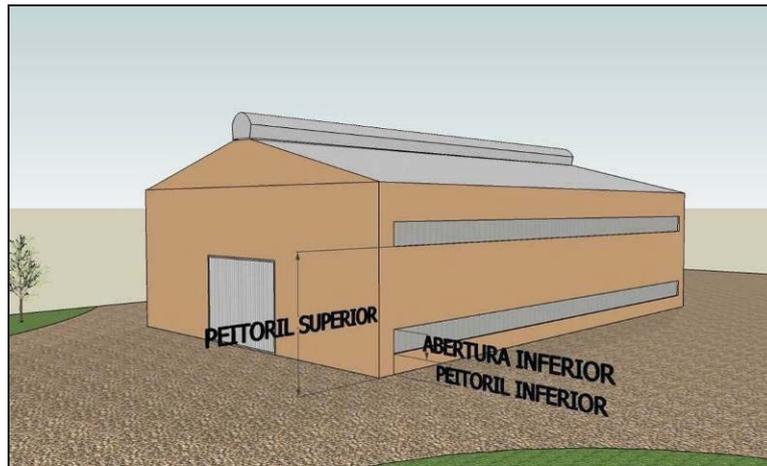


Figura 30: Pavilhão industrial com restrição

Desta forma, o problema abordado passa a ser formulado como:

$$\min f(A_{inf}, A_{sup}, P_{inf}, P_{sup}) = \left| \sum_{i=1}^{n_{inf}} A_{ent_i} + \sum_{j=1}^{n_{sup}} A_{sai_j} \right| \quad (50)$$

Sujeito a

$$Q_{nec} \leq Q_{calc} \quad (51)$$

$$P_{s(i)} + A_{s(i)} < P_d \quad i = 1, n_{sup} \quad (52)$$

$$P_{i(j)} + A_{i(j)} < P_s \quad j = 1, n_{inf} \quad (53)$$

$$A_{inf}(i) \geq 0 \quad i = 1, n_{sup} \quad (54)$$

$$A_{sup}(j) \geq 0 \quad j = 1, n_{inf} \quad (55)$$

Onde n_{sup} é o número de aberturas superiores e n_{inf} o número de aberturas inferiores.

3.2 Microsoft Excel Solver

São várias as possibilidades referentes aos programas computacionais que resolvem problemas de programação não-linear. Eles geralmente utilizam o agrupamento de vários algoritmos de otimização, denominados *solver* pela linguagem computacional. Essa forma de disposição dos algoritmos permite ao usuário a utilização de mais de um solver para a resolução de um determinado problema.

Dentre os vários programas computacionais de otimização existentes no mercado ou para fins acadêmicos, destacam-se: Programa ADS, Programa AMPL, Programa EASY, Programa GAMS, Programa LANCELOT, Programa MATLAB, a ferramenta Solver do MS-EXCEL, entre outros. O Solver do MS-EXCEL é o programa mais difundido mundialmente, dentre os citados. Para resolver problemas não-lineares, ele trabalha utilizando o método Gradiente Reduzido Generalizado, enquanto que, no caso de problemas lineares, o Solver usa o método Simplex com limites sobre as variáveis propostas (ROSAL, 2007)

O suplemento SOLVER da planilha eletrônica Microsoft Excel foi utilizado neste estudo por ter, dentre suas vantagens, fácil interpretação na planilha eletrônica e a eliminação de qualquer custo adicional com a aquisição de *software* para a resolução dos problemas. Seu principal objetivo é encontrar a solução para determinado problema, isto é, encontrar os valores para as variáveis de projeto, que satisfaçam as restrições enquanto maximizem ou minimizem a função objetivo (SOLVER INC., 2006).

O Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) é um método para a resolução de problemas de programação não-linear com restrições. O método prevê apenas a utilização de restrições lineares ou não-lineares de igualdade. Entretanto, para casos onde a restrição for de desigualdade, contorna-se o problema introduzindo-se variáveis de folga (se a restrição for do tipo menor ou igual), ou variáveis de excesso (no caso de restrições do tipo maior ou igual) (PAIVA, 2006).

A idéia básica é que um conjunto de restrições de igualdade não lineares é um sistema de equações onde, de maneira implícita, é possível colocar algumas variáveis em função de outras. Assim, minimizar com esse conjunto de restrições passa a ser um problema irrestrito cujas variáveis são, justamente, as variáveis selecionadas como independentes.

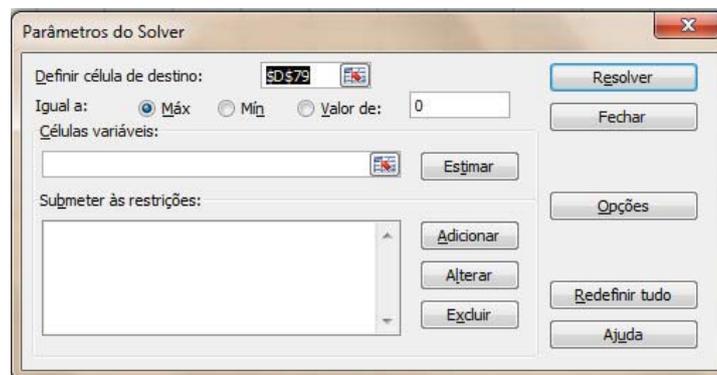
Quando há restrições de desigualdade procedimentos adequados para mudar de face devem ser introduzidos.

A seguir será apresentada a descrição desse *software* e as instruções utilizadas por ele na solução de problemas de otimização.

3.2.1 Parâmetros do modelo

A entrada de valores pode ser composta de números fixos associados com o problema, os quais serão referenciados como parâmetros de um modelo. Esses parâmetros são introduzidos nas células de dados e utilizados no cálculo da função objetivo e das restrições e são constantes para o Solver, podendo ter seus valores alterados pelo usuário. As situações ou variações podem mudar em um mesmo problema, modificando consequentemente os parâmetros em cada uma dessas variações.

Assim, para utilizar o Solver é necessária a especificação de um modelo, através da descrição das variáveis, da função objetivo e das restrições. A Caixa de Diálogo Parâmetros do Solver é utilizada para descrever o problema de otimização para o Excel. As definições dos itens presentes na Caixa de Diálogo (Figura 31) são descritas a seguir:



Fonte: Microsoft Excel (2007).

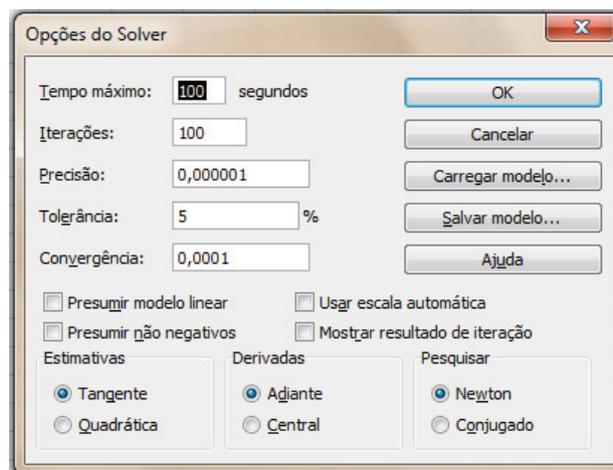
Figura 31: Janela dos parâmetros do Solver.

1. *Definir célula de destino* deve conter a localização da célula da função de objetivo para o problema em consideração. No caso de no modelo do Solver não se ter nada para maximizar ou minimizar, a célula de destino ficará vazia. Nesta situação, o Solver irá simplesmente encontrar uma solução que satisfaça às restrições.
2. *Máx ou Mín* podem ser selecionados para encontrar o máximo ou mínimo da célula – alvo;

3. Se *Valor de* for selecionado, o Solver tentará encontrar um valor para a Célula-Alvo igual a qualquer valor colocado na caixa, logo à direita dessa seleção.
4. Os parâmetros desenvolvidos no problema de otimização estão sujeitos a variações ou sob o controle do usuário. Esses parâmetros são aplicados para as variáveis de decisão e são relatadas na planilha eletrônica nas *Células variáveis* para maximizar ou minimizar o objetivo ou célula de destino.
5. As restrições devem ser especificadas na caixa *Submeter às restrições*. São limites impostos às células variáveis. O Solver considera que uma restrição é satisfeita se a condição que esta restrição especifica é verdadeira, observados pequenos limites de tolerância. Os valores de tolerância, precisão do Solver e métodos numéricos empregados na solução de um problema de otimização estão contidos no quadro de Opções do Solver.
6. *Redefinir tudo* limpa o problema atual e reinicializa todos os parâmetros aos seus valores padrão.

3.2.2 Opções do Solver

O padrão de opções do Solver pode ser modificado no quadro Opções do Solver (Figura 32) da caixa Opções do quadro Parâmetros Solver. O modelo do problema descrito na janela do Solver não é guardado automaticamente com o documento. Assim, para guardar o modelo (função objetivo, restrições e opções) deve-se usar o caixa Salvar Modelo e inserir a referência para a primeira célula de um intervalo vertical de células vazias no qual será armazenado o modelo de problema.



Fonte: Microsoft Excel (2007).

Figura 32: Microsoft Excel – Opções do Solver

Quando se pretender ler o modelo, dever-se-á usar a caixa Carregar Modelo e inserir a referência para todo o intervalo de células que contém o modelo de problema, ou seja, a área onde o modelo foi previamente guardado.

Uma solução (valores para as variáveis de decisão) para as quais todas as restrições no modelo são satisfeitas é denominada de solução factível. Na sequência, o Solver, primeiro, encontra uma solução factível e, após, procura melhorá-la, substituindo as variáveis de decisão de uma solução factível para outra solução factível, até que a função objetivo alcance um máximo ou mínimo. Esse processo é denominado de solução ótima.

A solução ótima pode ser global, quando não existe outra solução factível com valores mais adequados para a função objetivo, ou local, quando não existe outra solução com melhores valores na vizinhança. O Solver é programado para encontrar soluções ótimas, em condições ideais o ótimo global, porém nem sempre isso é possível. Em muitos casos, uma boa solução pode ser suficiente, ou seja, uma solução melhor que a anterior (SOLVER INC., 2011).

3.3 Implementação da formulação no Microsoft Excel Solver

A formulação desenvolvida foi implementada no Excel Solver. As vazões foram calculadas pelas formulações de:

- NORMA BRITÂNICA BS 5925 (1980);
- ASHRAE (2001);
- FROTA E SCHIFFER (2001);
- CLEZAR E NOGUEIRA (1999);
- SILVANI (2005)

Cada formulação estudada foi descrita em uma planilha do Microsoft Excel. As planilhas consideram as aberturas opostas, com e sem a consideração do vento. Na figura 33, é representada uma das planilhas, onde está organizada de forma esquemática em três partes:

-Dados do problema: onde são inseridos tanto os dados de entrada como os valores iniciais para as variáveis.

-Descrição do problema: onde são descritos de forma sucinta os objetivos, as variáveis e as restrições.

-Resolução do problema: onde são apresentados os valores da vazão necessária e a função objetivo para a solução atual.

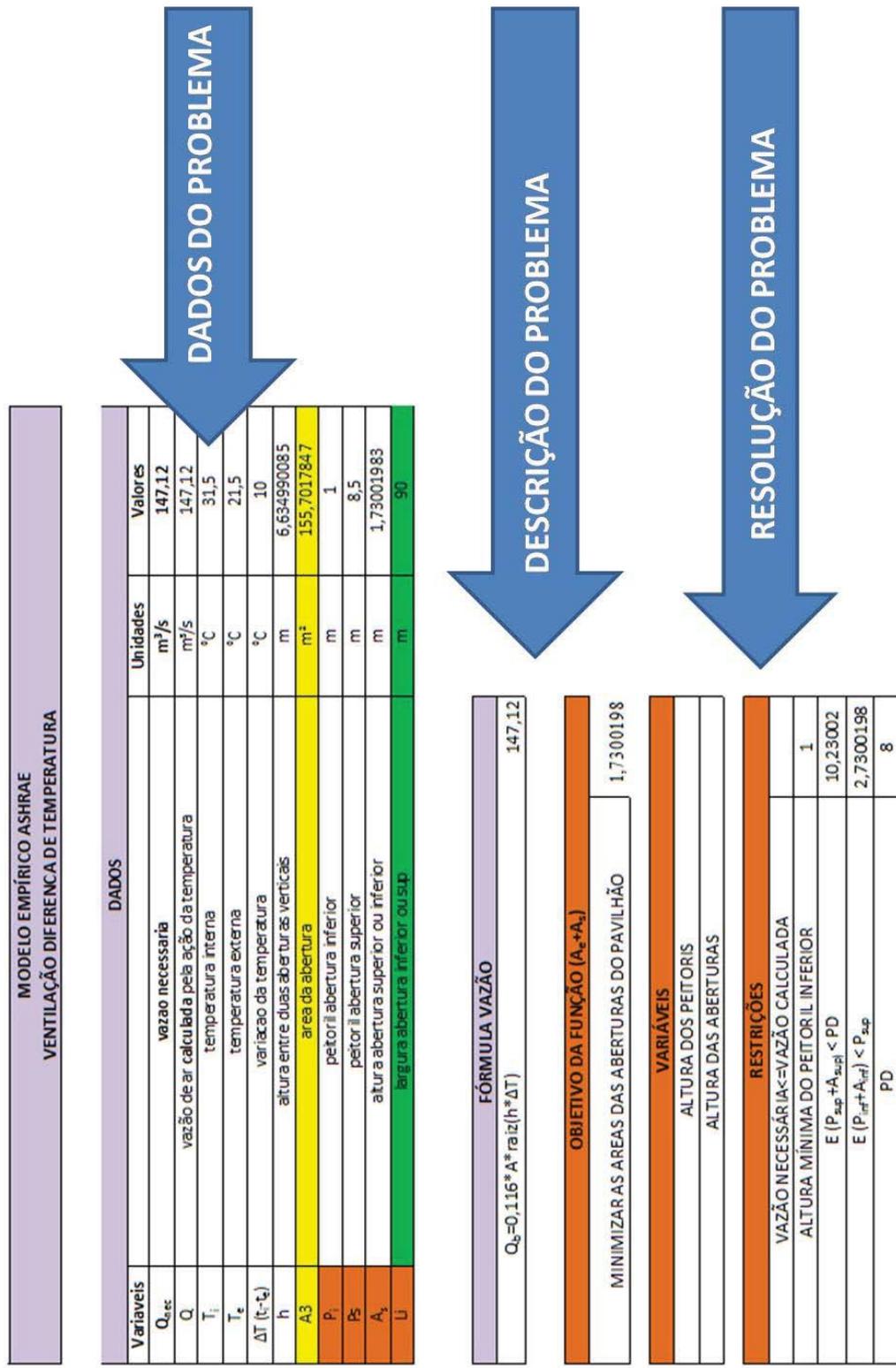


Figura 33: Planilha de cálculo - vazão de ar nas aberturas por diferença de temperatura

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

A partir da implementação da formulação proposta segundo os diferentes métodos teóricos para a determinação da vazão, o presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas distintas.

Na primeira etapa foi realizado o estudo de um pavilhão industrial considerando as características dos componentes das aberturas, a velocidade e direção do vento, a diferença de temperatura e vazão. Esta etapa validou a formulação descrita pelos diferentes métodos estudados, e identificou a importância do cálculo da vazão nas dimensões ótimas obtidas. Este estudo utilizou dados da NBR 6123 e valores obtidos por Silvani (2005) fazendo com que os modelos estudados servissem de base para a simulação computacional.

Em seguida, utilizando a simulação computacional, foi verificado como as dimensões e as disposições das aberturas em pavilhões influenciam na ventilação. As análises efetuadas tiveram como objetivo a proposição de parâmetros para a maximização do conforto térmico. Para tal, foram analisados pavilhões de diferentes dimensões e configurações. Nestas simulações, os pavilhões foram modelados com e sem ventilação natural aplicando o método de Clezar e Nogueira (1999). Este método engloba de forma clara os dados analisados e permite a identificação das aberturas de entrada e saída através dos coeficientes. Assim, as edificações especificadas no trabalho podem ter aberturas de áreas iguais ou não e com diferentes posições, mas com iguais coeficientes de descarga. A vazão do ar externa necessária, Q_e , foi calculada utilizando a expressão (3), com base no número de trocas de ar no ambiente e o volume do pavilhão em questão.

4.2 Aplicação das formulações desenvolvidas entre os diferentes modelos teóricos

Nesta etapa ocorreu a validação da formulação proposta aplicada nos diferentes modelos teóricos estudados para a determinação da vazão de ventilação. Os modelos teóricos Ashrae (2001); Frota e Schiffer (2000), Norma Britânica BS 5925 (1980), Clezar e Nogueira (1999) foram empregados, a título de exemplo, para verificar as vazões de ventilação de um determinado pavilhão industrial, utilizado como protótipo por Silvani (2005).

O modelo de pavilhão utilizado nesta etapa onde foram realizadas as aplicações das formulações possui 50 metros de largura e 100 metros de comprimento, 8m de pé-direito livre (desnível entre o piso e a face inferior da viga de cobertura) e um exaustor natural de cumeeira de

86 metros de extensão. Possui três aberturas, duas de ventilação de entrada (abertura inferior) e uma de ventilação de saída (abertura superior, chaminé), não contabilizando os portões (figura 34).

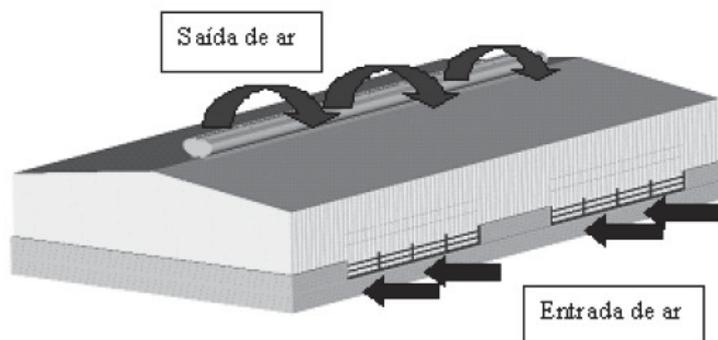


Figura 34: Modelo de pavilhão industrial

Para as análises foram atribuídos valores fixos de projeto retirados de Silvani (2005) para carga térmica, temperatura interna e externa, velocidade do vento, coeficientes de descarga e dimensões do exaustor de cumeeira, sendo:

- $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$ (diferença de temperatura do ar interno e externo);
- $t_e = 21,5^{\circ}\text{C}$ (temperatura do ar externo);
- $Q_{nec} = 147,12 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão de ar necessária);
- $\rho_e = 1,20 \text{ kg/m}^3$ (massa específica do ar externo)
- $C_p = 0,24 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ (calor específico do ar a pressão constante)
- $\rho_i = 1,16 \text{ kg/m}^3$ (massa específica do ar interno)

Os coeficientes de pressão para paredes e cobertura das diferentes zonas do galpão industrial considerados nos cálculos foram obtidos através da NBR 6123-86 – Forças devidas ao vento em edificações para vento 90° , sendo +0,7 e -0,5, agindo perpendicularmente às fachadas principais.

Da mesma forma que foram obtidos os valores das aberturas no efeito chaminé, determinaram-se os valores das aberturas para o efeito do vento. Esse cálculo foi realizado utilizando os coeficientes de pressão interna e externa a 90° . A tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as dimensões das aberturas segundo os diferentes métodos (SILVANI, 2005). Na tabela 7, são apresentados os resultados obtidos para os mesmos métodos, através da otimização segundo a formulação proposta. O método da norma BS 5925 não foi considerado nesta etapa por não ter valores para referência.

Da tabela 6 observa-se que as áreas encontradas variam significativamente entre os métodos “Clezar e Nogueira (1999)” e “Frota e Schiffer (2000)”, apresentados como maior e menor área respectivamente.

MÉTODO	AREA DE ENTRADA E SAIDA (m ²)
ASHRAE (2001);	61,36
FROTA E SCHIFFER (2000);	55,95
CLEZAR E NOGUEIRA (1999);	48,25

Tabela 5 Áreas de entrada e saída de ar considerando o efeito do vento

A tabela 7 apresenta os resultados otimizados, obtidos com o emprego do Solver para as áreas de aberturas empregando os mesmos métodos.

MÉTODO	AREA DE ENTRADA OU SAIDA (m ²)
ASHRAE (2001);	50,41
FROTA E SCHIFFER (2000);	53,61
CLEZAR E NOGUEIRA (1999);	44,92

Tabela 6 Resultados otimizados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito do vento

Os valores das áreas das aberturas obtidas a partir da aplicação dos métodos são comparados com as áreas das aberturas pelo Solver. A figura 35 sintetiza os valores descritos nas tabelas 6 e 7.

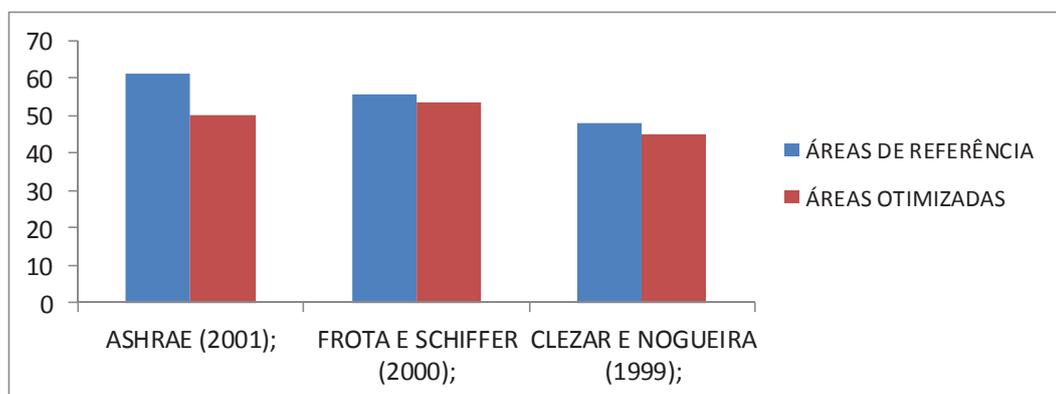


Figura 35: Comparação das áreas das aberturas considerando o efeito do vento

Com base na figura 35, pode-se observar que a maioria dos valores otimizados está próxima aos determinados pela aplicação dos métodos. Foram considerados nos métodos áreas das aberturas iguais, com única variável, $A_i=A_s$, relativa à altura da abertura superior e/ou inferior. As variações entre as áreas com a utilização do suplemento Solver ficaram em: 21% no método

Ashrae (2001); 5% no método de Frota e Schiffer (2000) e 8% no método de Clezar e Nogueira (1999).

Na sequência, as áreas das aberturas foram encontradas utilizando os métodos Ashrae (2001), Frota e Schiffer (2000), Norma Britânica BS 5925 (1980), Clezar e Nogueira (1999) considerando apenas o efeito chaminé. Os valores das áreas de entrada e saída, fornecidos por cada um dos métodos, estão descritos na tabela 8.

MÉTODO	AREA DE ENTRADA OU SAIDA (m ²)
ASHRAE (2001);	140,11
FROTA E SCHIFFER (2000);	116,76
CLEZAR E NOGUEIRA (1999);	150,50
BS 5925 (1980);	163,73

Tabela 7 Resultados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito chaminé

Os resultados encontrados na aplicação dos métodos considerando o efeito chaminé variaram em torno de 40%. “Considerando como resultado de valor mínimo a área resultante do método “Frota e Schiffer (2000)” e de valor máximo do método “Norma BS 5925”.

Para os mesmos métodos descritos efetuou-se a determinação das dimensões ótimas das aberturas com o emprego do Solver. A figura 36 apresenta uma das planilhas desenvolvidas com essa finalidade.

MODELO EMPÍRICO ASHRAE VENTILAÇÃO AÇÃO DO VENTO			
DADOS			
Variáveis		Unidades	Valores
Q_{nec}	vazão necessaria	m ³ /s	147,12
Q	vazão de ar pela ação dos ventos	ft ³ /min	311726,6832
E	efetividade da abertura 0,5-0,6- vento perpendicular e 0,25-0,35 vento diagonal		0,6
A	area livre das aberturas	ft ²	659,8227991
V	velocidade media do vento	ft/min	787,4
A1	area de abertura- entrada	m ²	34,36352031
A2	area de abertura- entrada	m ²	0
A3	area de abertura- saída	m ²	27
A4	area de abertura- saída	m ²	0
P _i	peitoril abertura inferior	m	1
P _s	peitoril abertura superior	m	5
A _i	altura abertura inferior	m	0,381816892
A _s	altura abertura superior	m	0,3

FÓRMULA VAZÃO	
$Q_w = E \cdot A \cdot V$	311726,68

OBJETIVO DA FUNÇÃO (A _e +A _s)	
MINIMIZAR AS ÁREAS DAS ABERTURAS DO PAVILHÃO	61,36352

VARIÁVEIS	
ALTURA DOS PEITORIS	
ALTURA DAS ABERTURAS	

RESTRICÕES	
VAZÃO NECESSÁRIA <= VAZÃO CALCULADA	
ALTURA MÍNIMA DO PEITORIL INFERIOR	1
$E (P_{sup} + A_{sup}) < PD$	5,3
$E (P_{inf} + A_{inf}) < P_{sup}$	1,3818169
PD	8

Figura 36: Método ASHRAE (2001)

A tabela 9 apresenta os resultados otimizados, obtidos com o emprego do Solver para as áreas de aberturas empregando os mesmos métodos.

MÉTODO	AREA DE ENTRADA OU SAIDA (m ²)
ASHRAE (2001)	155,70
FROTA E SCHIFFER (2000)	116,42
CLEZAR E NOGUEIRA (1999)	129,00
BS 5925 (1980)	127,68

Tabela 8 Resultados otimizados das áreas necessárias das aberturas obtidas considerando o efeito chaminé

4.2.1 Comparação dos resultados

Os valores das áreas das aberturas obtidas a partir da aplicação dos métodos são comparados com as áreas das aberturas pelo Solver. A figura 37 sintetiza os valores descritos nas tabelas 8 e 9.

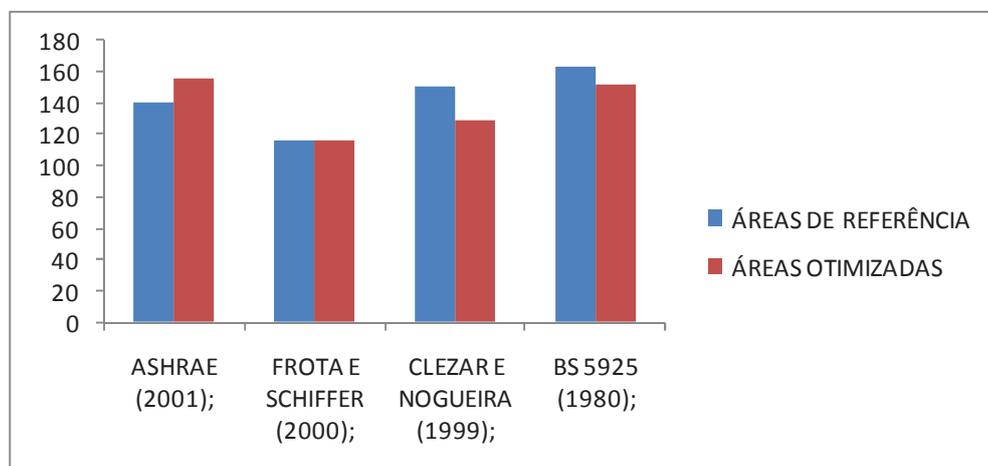


Figura 37: Comparação das áreas das aberturas considerando o efeito chaminé

Com base na figura 37, pode-se observar que a maioria dos valores otimizados está próxima aos determinados pela aplicação dos métodos. As variações entre as áreas com a utilização do suplemento Solver ficaram em: 11% no método Ashrae (2001); não variando no método de Frota e Schiffer (2000), 16% no método de Clezar e Nogueira (1999) e em torno de 28% no método da Norma Britânica BS 5925 (1980). Foram considerados nos métodos áreas das aberturas iguais, com única variável, $A_i=A_s$, relativa à altura da abertura superior e/ou inferior.

A figura 38 mostra a comparação entre as áreas das aberturas otimizadas para os efeitos chaminé e vento. Percebe-se que utilizando o vento no cálculo da vazão ocorre uma grande diminuição das áreas das aberturas calculadas. Nos casos ilustrados essa redução oscila entre 53,95% encontrado no método “Frota e Schiffer (2000)” e 65,17% no método de “Clezar e Nogueira (1999)”.

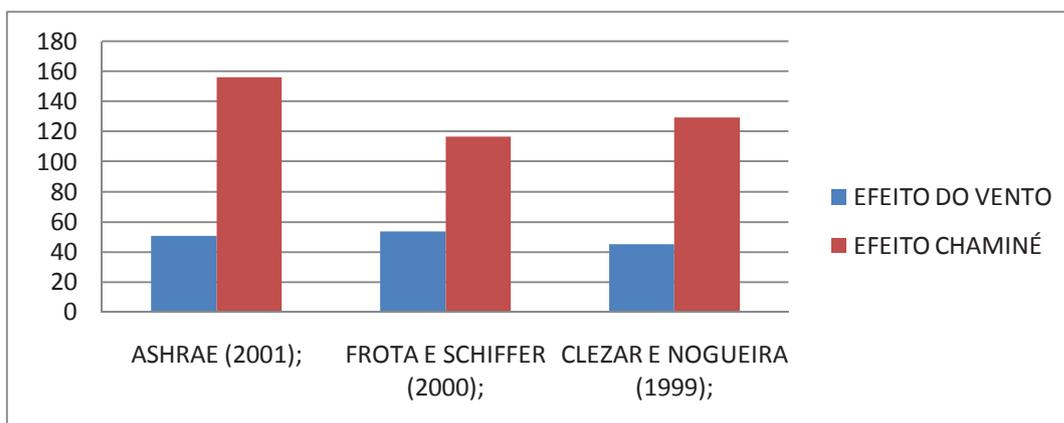


Figura 38: Comparação das áreas das aberturas com o uso dos efeitos do vento e chaminé

4.3 Estudo das dimensões ótimas – Aberturas

Na presente etapa do estudo, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise das áreas das aberturas em diferentes modelos de pavilhões. Essas análises foram efetuadas com base na literatura técnica e em aplicações da construção civil e buscaram identificar relações entre as dimensões a fim de auxiliar o dimensionamento das edificações.

Para o cálculo das dimensões otimizadas optou-se pela utilização do método proposto por Clezar e Nogueira (1999). Este modelo é baseado na NBR 6123/87 – Forças devidas ao vento em edificações, e permite calcular a vazão de ar considerando o efeito chaminé, o efeito dos ventos, ou então, ambos os efeitos simultaneamente, através de uma formulação única. A formulação engloba todas as variáveis solicitadas para o cálculo da vazão de ar requerida. O preenchimento dos dados solicitados pela formulação possibilita o uso da mesma em simulações gerais, além de permitir qualquer número e distribuição de aberturas.

4.3.1 Dados dos modelos dos pavilhões

A eficiência da ventilação natural depende tanto do dimensionamento das aberturas para a passagem de ar como da ação combinada das forças do vento e das diferenças de temperatura. No caso de pavilhões industriais, além de aberturas nas fachadas, é usual utilizar aberturas nas coberturas (lanternins) para se obterem iluminação e ventilação natural.

O dimensionamento do pé direito do prédio influi diretamente no conforto térmico, pois o efeito chaminé que promove a ventilação natural ocorre proporcionalmente à variação da altura do

edifício. Quando se tem variação no pé-direito do prédio, mantendo-se as demais características, a ventilação natural aumenta substancialmente.

Para verificar a influência das dimensões e disposições das aberturas nas fachadas foram feitas simulações em pavilhões com dimensões variadas. Utilizou-se como um dos parâmetros para a escolha das dimensões a tabela elaborada por Scigliano & Hollo (2001) onde é indicado o pé direito recomendável em função das dimensões do prédio.

Conforme citam os autores, Scigliano & Hollo (2001), o pé direito do edifício influi diretamente no conforto, pois o efeito chaminé que gera a ventilação natural varia proporcionalmente à variação da altura do prédio. Nas análises efetuadas no presente estudo foram considerados pavilhões com larguras de 30, 45 e 60 metros e comprimentos de 60, 90 e 120 metros. As alturas de pé direito empregadas foram 6, 8 e 10 metros. As dimensões descritas foram combinadas gerando vinte e sete modelos de pavilhões, designados conforme tabela 10.

Identificação do modelo	Dimensões (m)	Identificação do modelo	Dimensões (m)	Identificação do modelo	Dimensões (m)
P01	60x30x6	P10	60x30x8	P19	60x30x10
P02	60x45x6	P11	60x45x8	P20	60x45x10
P03	60x60x6	P12	60x60x8	P21	60x60x10
P04	90x30x6	P13	90x30x8	P22	90x30x10
P05	90x45x6	P14	90x45x8	P23	90x45x10
P06	90x60x6	P15	90x60x8	P24	90x60x10
P07	120x30x6	P16	120x30x8	P25	120x30x10
P08	120x45x6	P17	120x45x8	P26	120x45x10
P09	120x60x6	P18	120x60x8	P27	120x60x10

Tabela 9 Tabela de configurações de dimensionamento dos pavilhões

As vinte e sete configurações resultantes foram aplicadas em três modelos de pavilhões diferenciados pela localização e fechamento de aberturas:

TIPO 01- Aberturas de parede e cobertura: Modelo de pavilhão com duas aberturas, sendo uma abertura inferior localizada na fachada a barlavento para o ângulo de 90° e outra abertura superior como exaustor de cumeeira (figura 39). Neste caso as variáveis do problema analisadas foram: a altura da abertura inferior, a largura da abertura superior (lanternim) e a altura do peitoril (dimensão mínima= 1 metro).

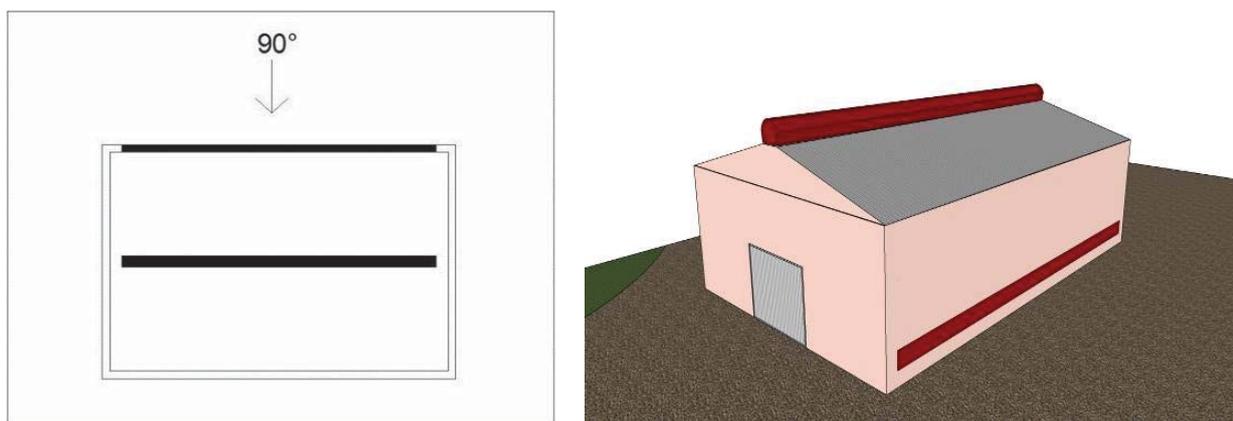


Figura 39: Modelo Tipo 1

TIPO 02- Aberturas opostas de paredes: Modelo de pavilhão com duas aberturas localizadas nas fachadas a sotavento e a barlavento para o ângulo de 90° (figura 40). Analisadas as alturas das aberturas considerando a dimensão mínima do peitoril (1 metro).

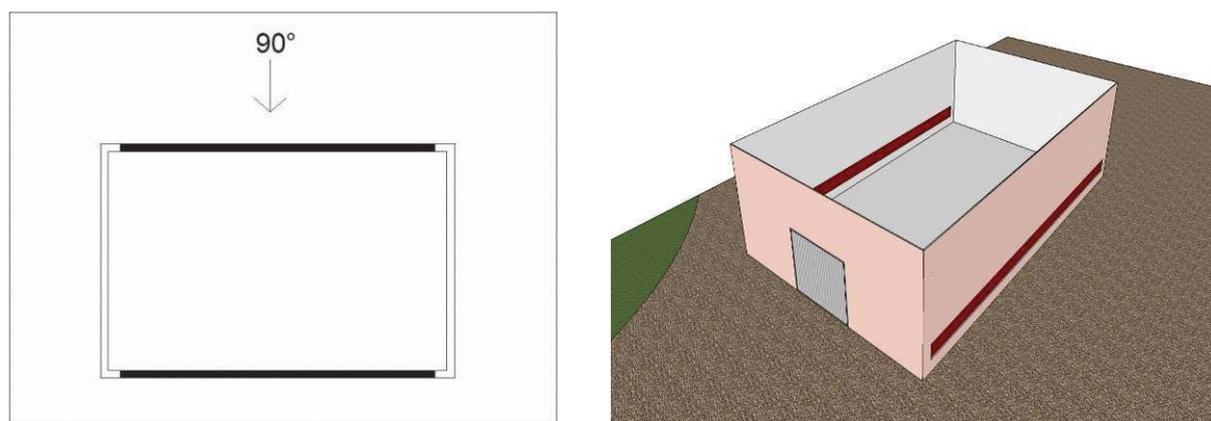


Figura 40: Modelo Tipo 2

TIPO 03- Aberturas opostas de paredes e cobertura: Modelo de pavilhão com três aberturas, sendo duas aberturas localizadas nas fachadas a sotavento e a barlavento para o ângulo de 90° e uma abertura superior como exaustor de cumeeira (figura 41). Nesta configuração variam as alturas das aberturas inferiores e a largura da abertura superior (lanternim). Considerou-se a altura do peitoril com dimensão mínima (1 metro).

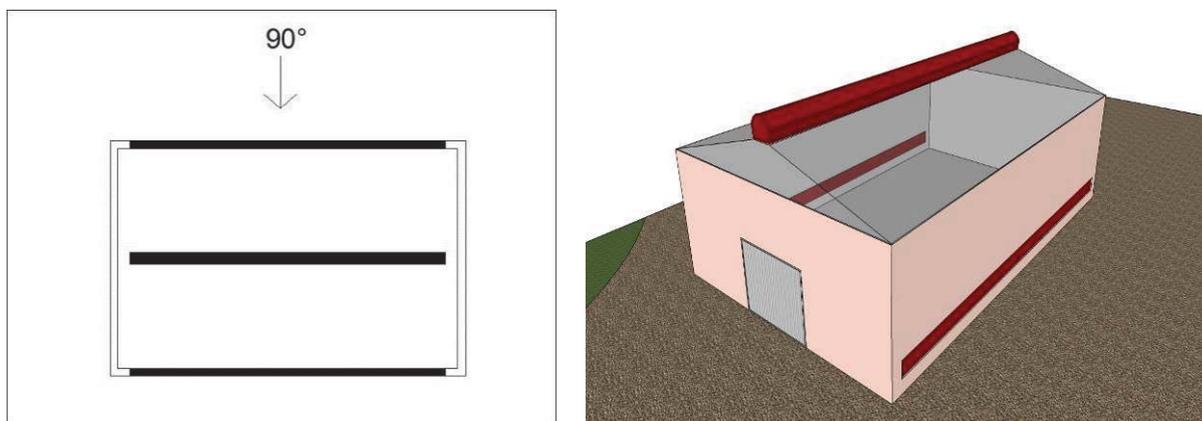


Figura 41: Modelo Tipo 3

A planilha Excel foi configurada através da metodologia proposta por Clezar e Nogueira (1999). Cada planilha recebeu as dimensões do pavilhão em questão, os dados fixos de temperatura, coeficientes e velocidade do ar além das dimensões iniciais das aberturas denominadas como variável do problema. Como esta formulação engloba todos os dados necessários para o cálculo da vazão, foi utilizado como parâmetro de diferenciação dos efeitos, vento e chaminé, o uso ou não do vento.

A vazão necessária foi determinada com base no volume de cada pavilhão considerando 11 trocas de ar/h. Em função das dimensões relativas, foram determinados os coeficientes de pressão conforme a NBR 6123/87. Os demais dados utilizados foram os mesmos descritos no item anterior.

Para minimizar as áreas das aberturas do pavilhão (função objetivo) estabeleceram-se as variáveis (altura dos peitoris e aberturas) e restrições (altura mínima do peitoril e vazão necessária com valor próximo da calculada) da formulação. Com a inserção dos dados nas devidas células, o cálculo se dá de forma iterativa permitindo que o suplemento Solver encontre a solução ótima para a função.

4.4 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos para cada uma das oitenta e uma análises foram diagramados para comparação de resultados da formulação proposta. A figura 42 apresenta, a título de exemplo, as áreas obtidas para as aberturas de entrada e saída em cada uma das análises efetuadas para o modelo de pavilhão tipo 01.

RESULTADOS

DIMEN. DO PAVILHÃO		AREA TOT. ABERT.	AREA ABERTURA		ALT. DAS ABERT.		COMP. DAS ABERT.		ALT. DOS PEITORIS		VAZAO NECESSARIA
			INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	
P01	60x30x6	40	19,84	20,16	0,35	0,36	56	56	1	6	33
		84,23	40,84	43,39	0,72	0,77	56	56	1	6	33
P02	60x45x6	60	29,72	30,28	0,53	0,54	56	56	1	6	49,5
		126,18	60,4	65,77	1,07	1,17	56	56	1	6	49,5
P03	60x60x6	80	39,57	40,43	0,7	0,72	56	56	1	6	66
		167,95	79,39	88,55	1,41	1,58	56	56	1	6	66
P04	90x30x6	60	29,76	30,24	0,34	0,35	86	86	1	6	49,5
		126,36	61,3	65,06	0,71	0,75	86	86	1	6	49,5
P05	90x45x6	90	44,58	45,4	0,51	0,52	86	86	1	6	74,25
		189,3	90,7	98,6	1,05	1,14	86	86	1	6	74,25
P06	90x60x6	120	59,36	60,63	0,69	0,7	86	86	1	6	99
		251,97	119,26	132,7	1,38	1,54	86	86	1	6	99
P07	120x30x6	80	39,68	40,32	0,34	0,34	116	116	1	6	66
		168,49	81,76	86,72	0,7	0,74	116	116	1	6	66
P08	120x45x6	120	59,44	60,55	0,51	0,52	116	116	1	6	99
		252,41	120,99	131,42	1,04	1,13	116	116	1	6	99
P09	120x60x6	160	79,15	80,84	0,68	0,69	116	116	1	6	132
		335,99	159,11	176,87	1,37	1,52	116	116	1	6	132
RESULTADOS											
DIMEN. DO PAVILHÃO		AREA TOT. ABERT.	AREA ABERTURA		ALT. DAS ABERT.		COMP. DAS ABERT.		ALT. DOS PEITORIS		VAZAO NECESSARIA
			INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	
P10	60x30x8	51,08	25,32	25,76	0,45	0,46	56	56	1	8	44
		94,96	46,27	48,69	0,82	0,86	56	56	1	8	44
P11	60x45x8	72,62	37,92	38,7	0,67	0,69	56	56	1	8	66
		142,31	68,63	73,68	1,22	1,31	56	56	1	8	66
P12	60x60x8	102,16	50,49	51,67	0,9	0,92	56	56	1	8	88
		189,52	90,48	99,04	1,61	1,76	56	56	1	8	88
P13	90x30x8	76,63	37,98	38,64	0,44	0,44	86	86	1	8	66
		142,45	69,44	73	0,8	0,84	86	86	1	8	66
P14	90x45x8	114,94	56,89	58,04	0,66	0,67	86	86	1	8	99
		213,49	103,04	110,44	1,19	1,28	86	86	1	8	99
P15	90x60x8	153,25	75,74	77,5	0,88	0,9	86	86	1	8	132
		284,32	135,86	148,46	1,57	1,72	86	86	1	8	132
P16	120x30x8	102,17	50,65	51,51	0,43	0,44	116	116	1	8	88
		189,94	92,61	97,32	0,79	0,83	116	116	1	8	88
P17	120x45x8	153,25	75,86	77,38	0,65	0,66	116	116	1	8	132
		284,66	137,43	147,22	1,18	1,26	116	116	1	8	132
P18	120x60x8	204,33	101	103,33	0,87	0,89	116	116	1	8	176
		379,12	181,25	197,87	1,56	1,7	116	116	1	8	176
RESULTADOS											
DIMEN. DO PAVILHÃO		AREA TOT. ABERT.	AREA ABERTURA		ALT. DAS ABERT.		COMP. DAS ABERT.		ALT. DOS PEITORIS		VAZAO NECESSARIA
			INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.	
P19	60x30x10	61,37	30,41	30,95	0,54	0,55	56	56	1	10	55
		104,71	51,17	53,53	0,91	0,95	56	56	1	10	55
P20	60x45x10	92,06	45,54	46,51	0,81	0,83	56	56	1	10	82,5
		156,95	76,05	80,92	1,35	1,44	56	56	1	10	82,5
P21	60x60x10	122,74	60,61	62,12	1,08	1,1	56	56	1	10	110
		209,08	100,39	108,69	1,79	1,94	56	56	1	10	110
P22	90x30x10	92,06	45,63	46,43	0,53	0,53	86	86	1	10	82,5
		157,07	76,79	80,28	0,89	0,93	86	86	1	10	82,5
P23	90x45x10	138,09	68,32	69,76	0,79	0,81	86	86	1	10	123,75
		235,45	114,12	121,32	1,32	1,41	86	86	1	10	123,75
P24	90x60x10	184,11	90,93	93,17	1,05	1,08	86	86	1	10	165
		313,66	150,73	162,92	1,75	1,89	86	86	1	10	165
P25	120x30x10	122,75	60,84	61,91	0,52	0,53	116	116	1	10	110
		209,43	102,4	107,02	0,88	0,92	116	116	1	10	110
P26	120x45x10	184,12	91,1	93,02	0,78	0,8	116	116	1	10	165
		313,94	152,21	161,72	1,31	1,39	116	116	1	10	165
P27	120x60x10	245,48	121,25	124,22	1,04	1,07	116	116	1	10	220
		418,23	201,07	217,16	1,73	1,87	116	116	1	10	220

Figura 42: Planilha com áreas obtidas nas simulações

Para melhor compreensão e visualização de como as aberturas e suas posições influenciam o sistema de ventilação, estabeleceram-se três relações entre as áreas encontradas e as dimensões do pavilhão simulado:

- Relação “Área total das aberturas / Área de piso” descritas nas figuras 43 a 51;
- Relação “Área total das aberturas / Volume” descrita na figura 44;
- Relação “Área de entrada / Área de saída” descrita na figura 45.

Em todas as otimizações efetuadas, a distância vertical entre as aberturas de entrada e saída foi a maior possível conforme a configuração e os limites adotados (peitoril e pé-direito). Esses resultados apresentam concordância com o observado por Neves (2005), segundo o qual a taxa de ventilação é proporcional à distância vertical entre as aberturas.

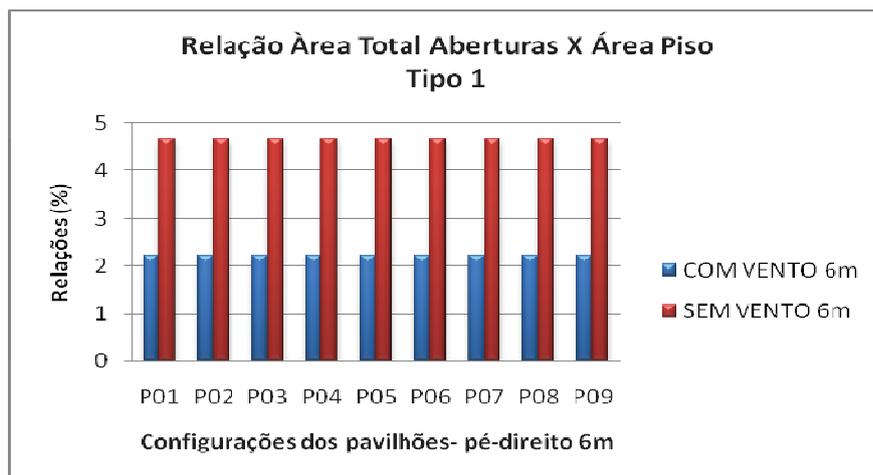


Figura 43: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

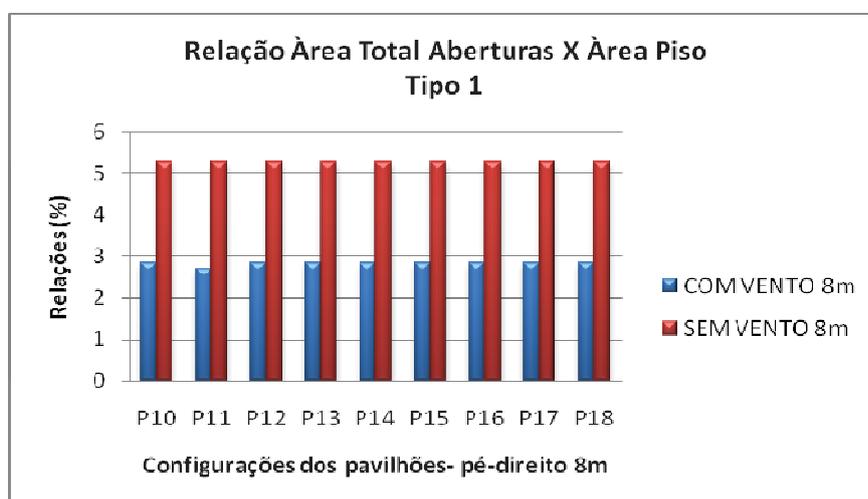


Figura 44: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

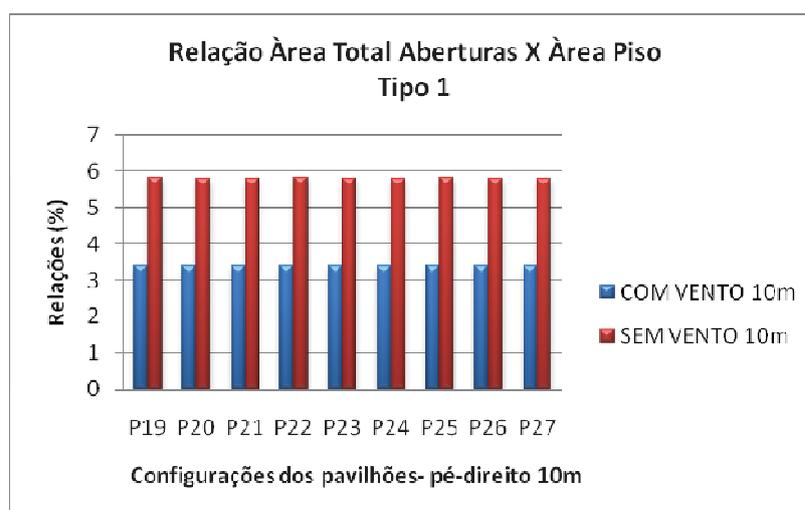


Figura 45: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

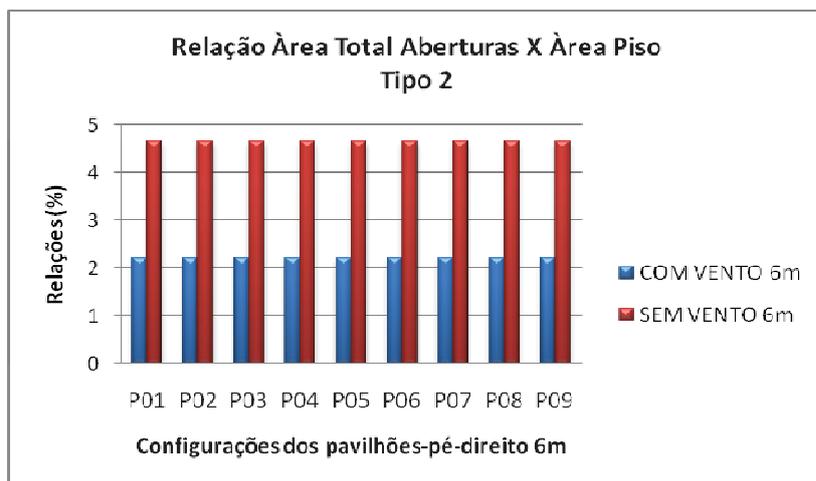


Figura 46: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

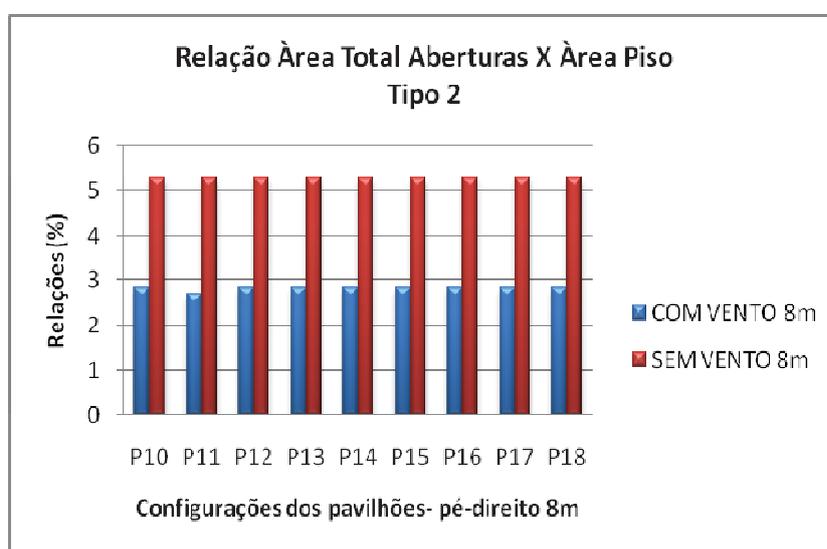


Figura 47: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

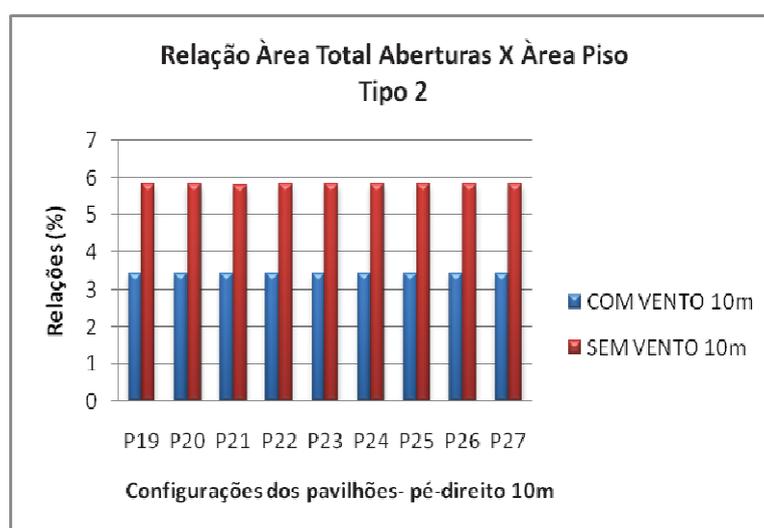


Figura 48: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

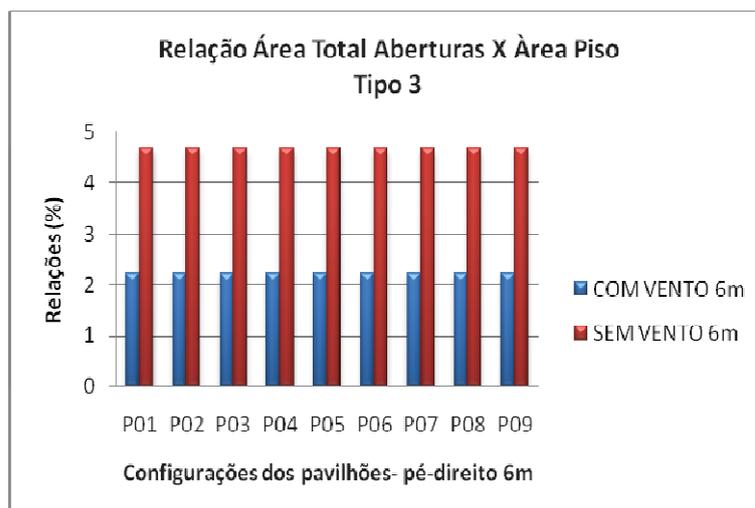


Figura 49: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

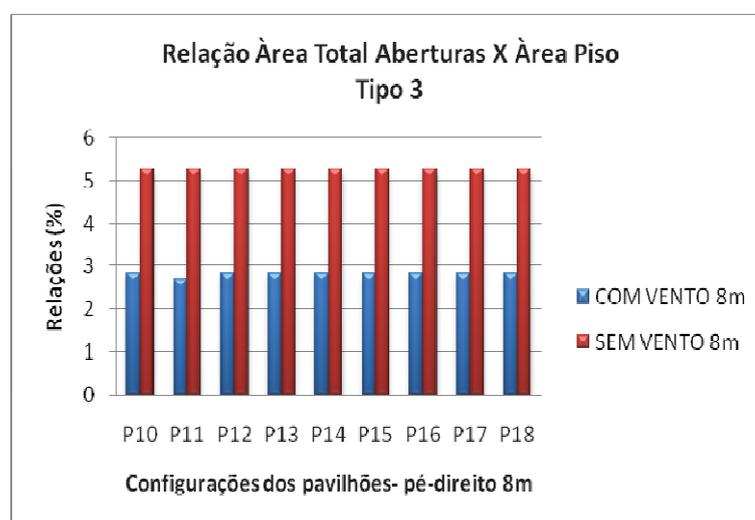


Figura 50: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

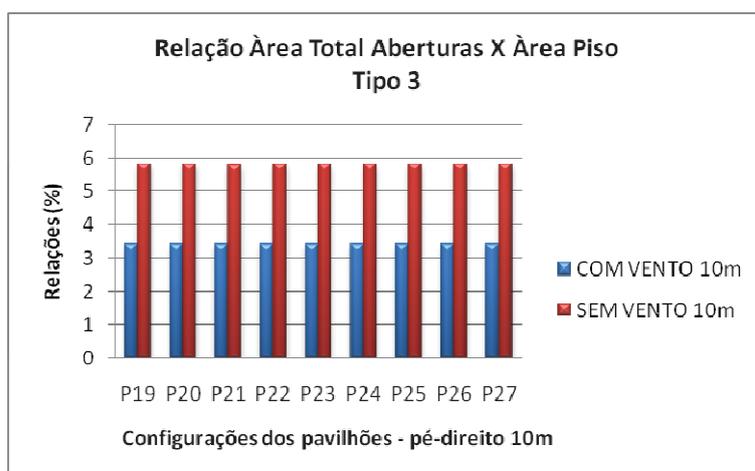


Figura 51: Relação Área Total Aberturas / Área Piso dos modelos ensaiados

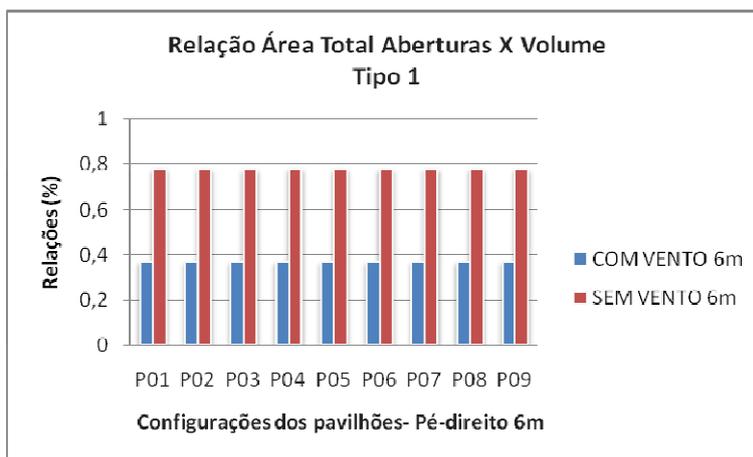


Figura 52: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

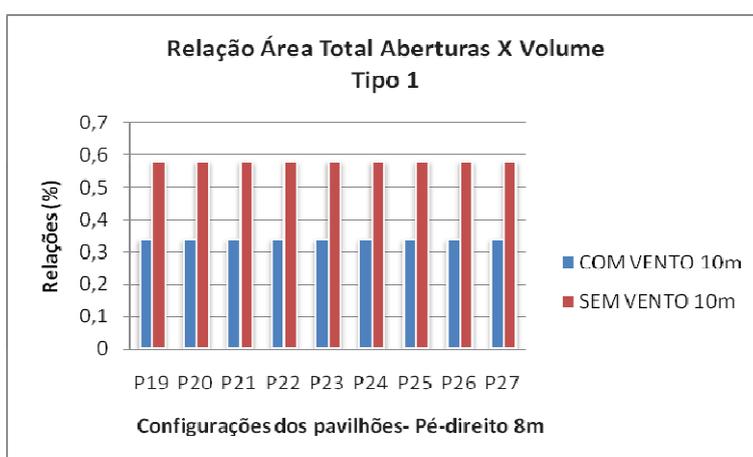


Figura 53: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

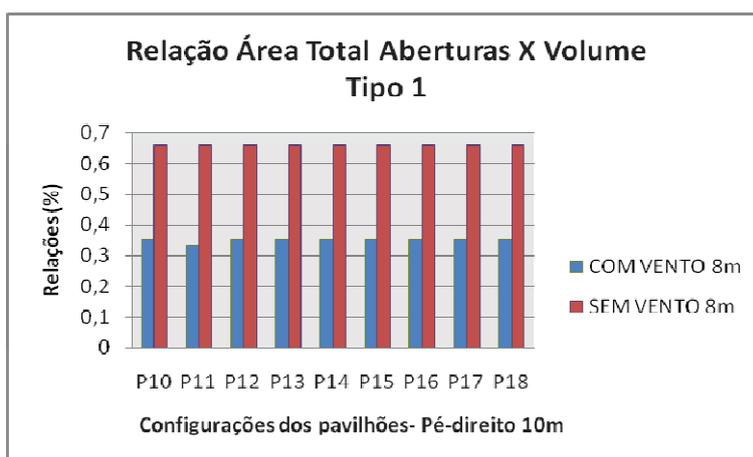


Figura 54: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

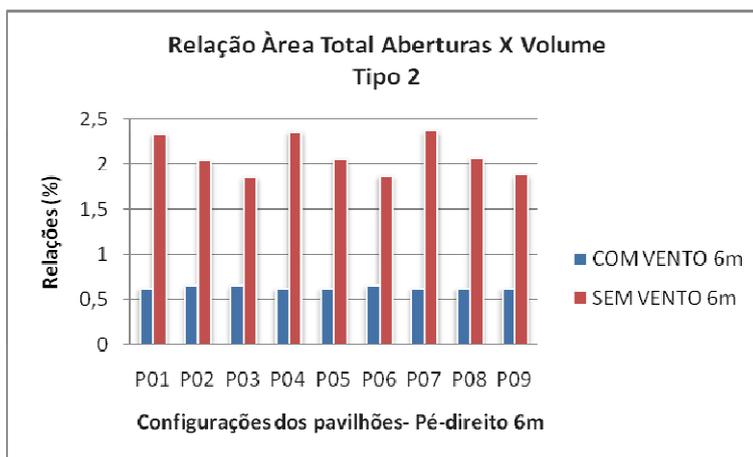


Figura 55: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

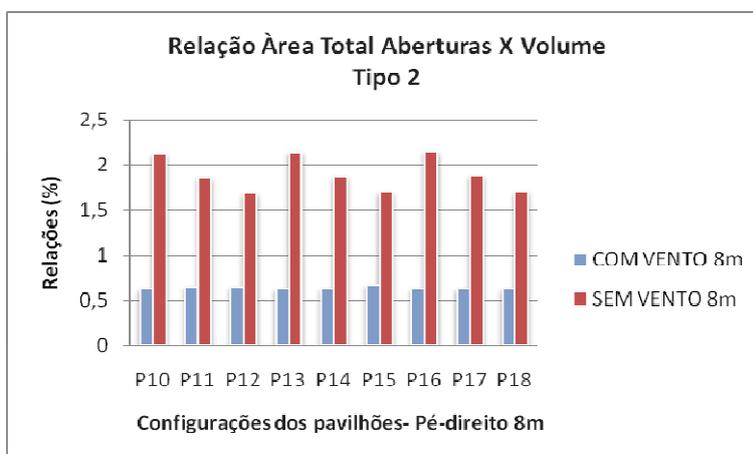


Figura 56: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

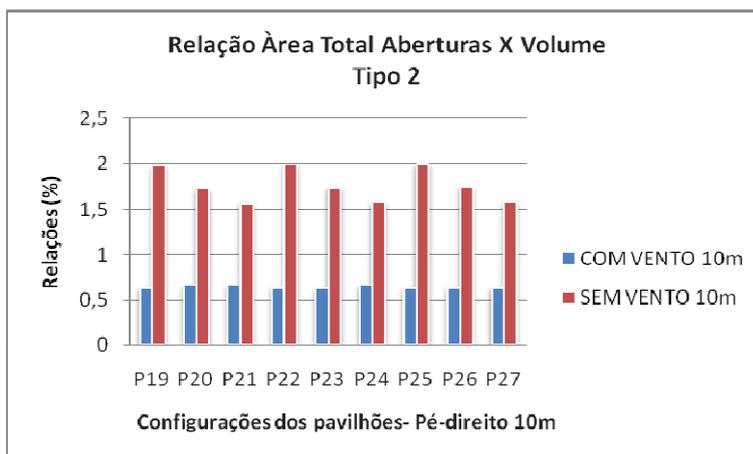


Figura 57: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

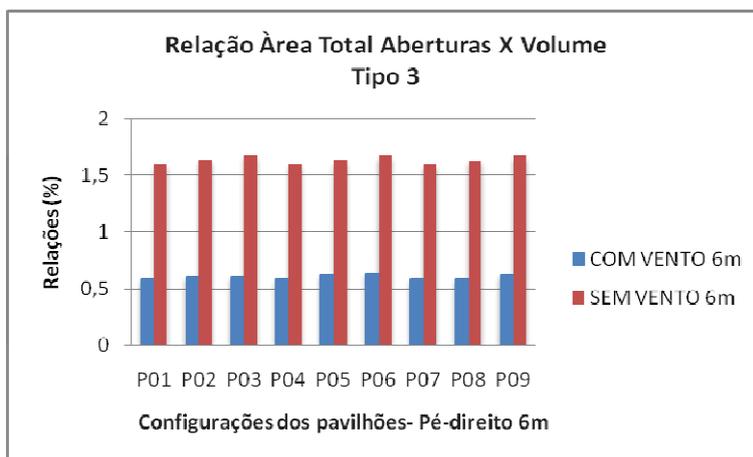


Figura 58: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

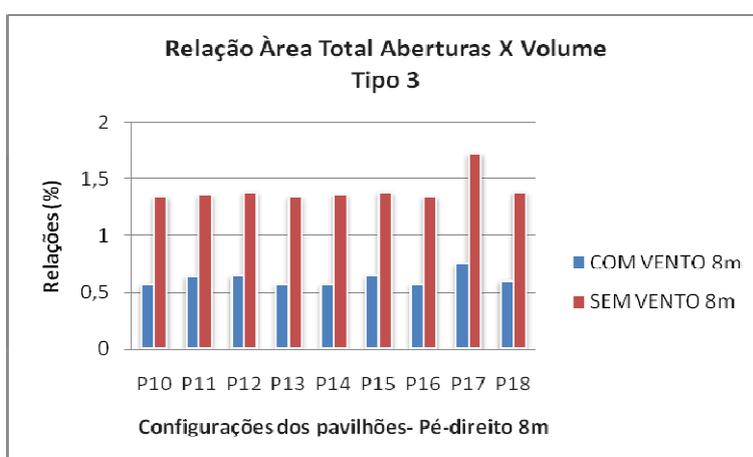


Figura 59: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

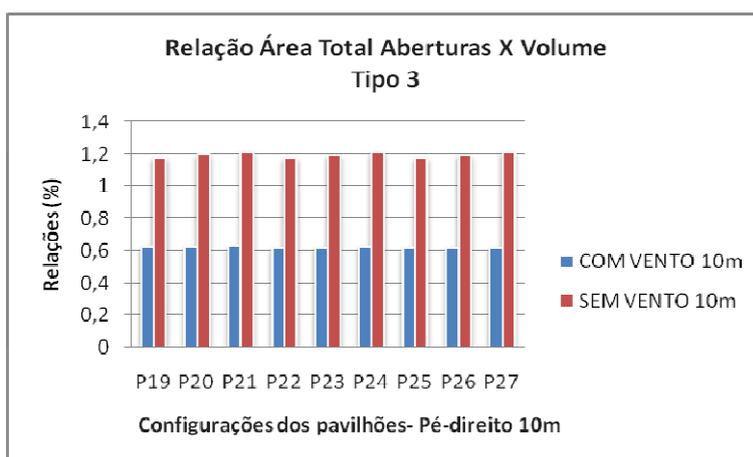


Figura 60: Relação Área Total Aberturas / Volume dos modelos ensaiados

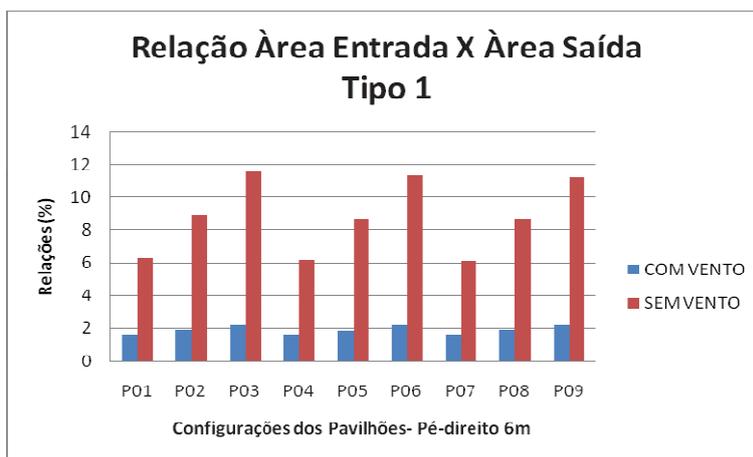


Figura 61: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

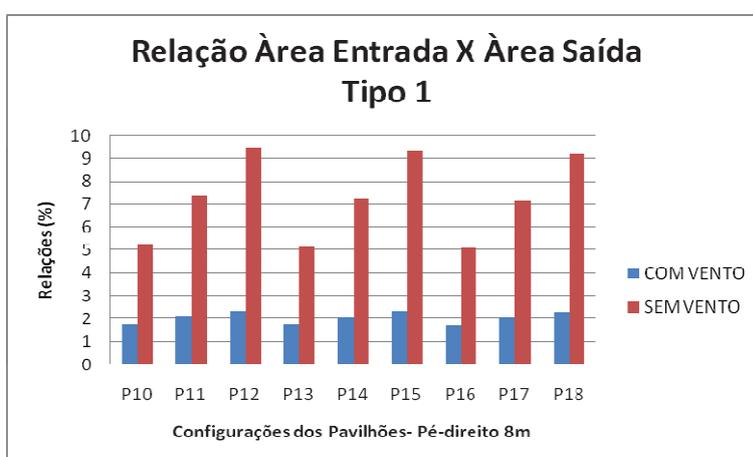


Figura 62: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

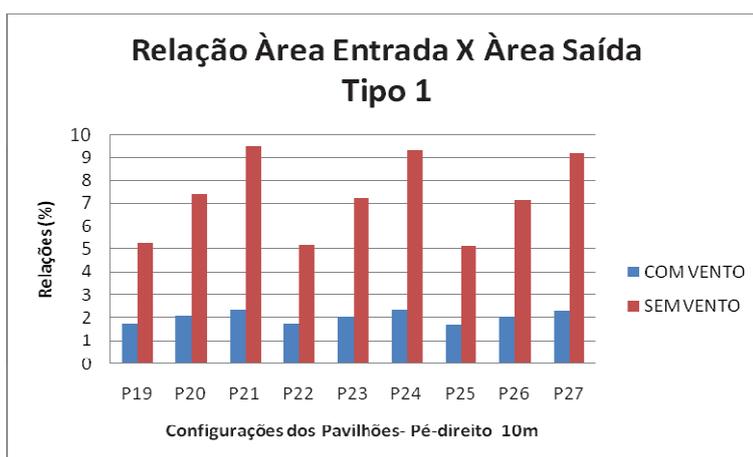


Figura 63: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

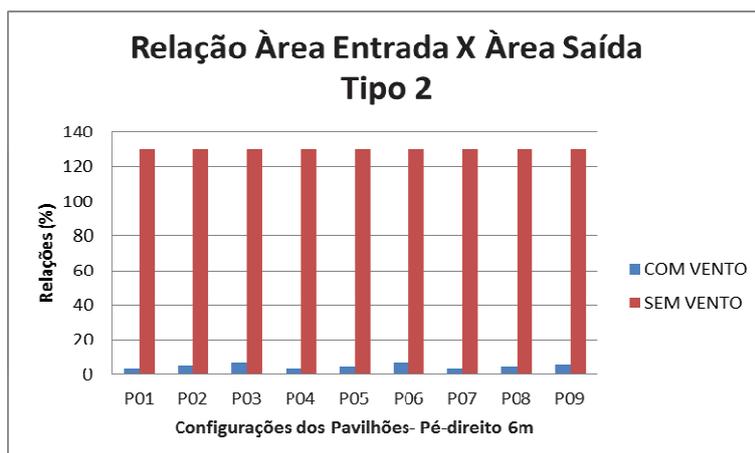


Figura 64: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

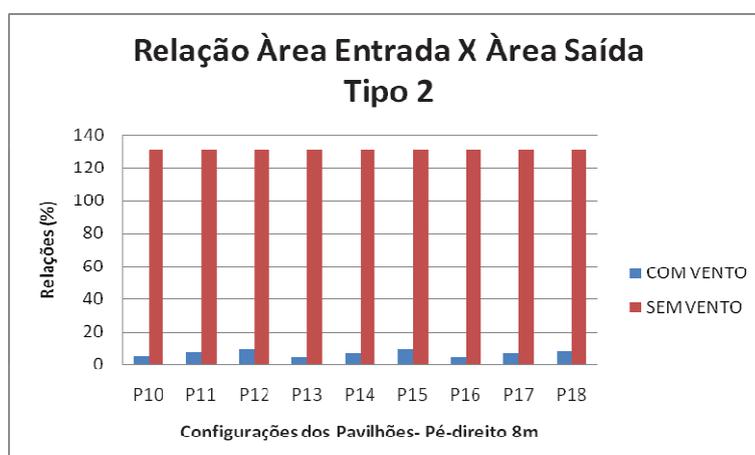


Figura 65: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

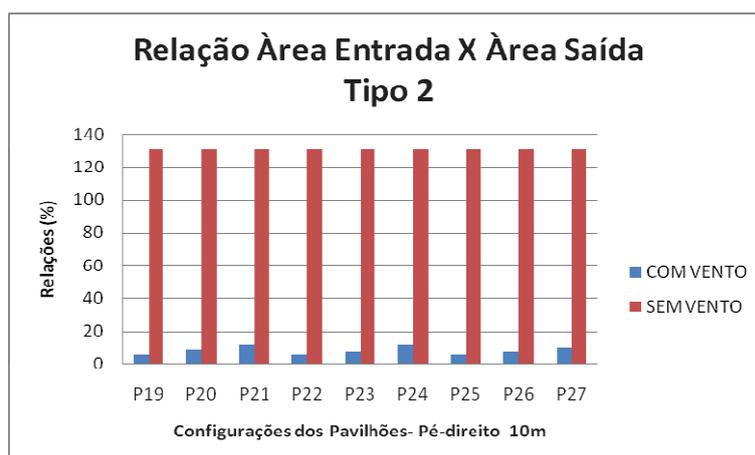


Figura 66: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

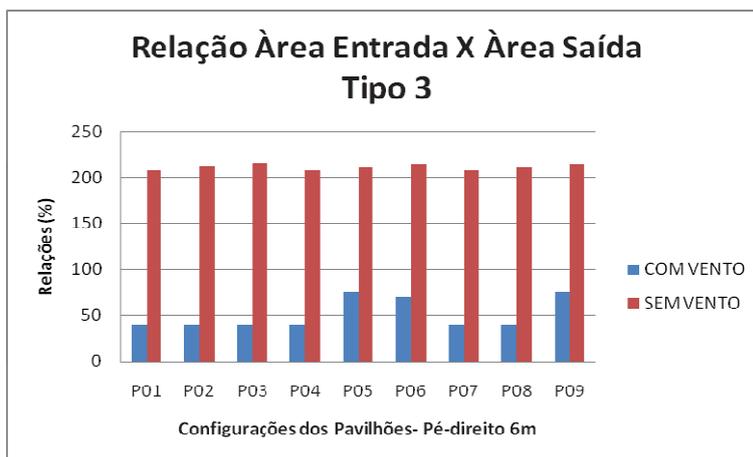


Figura 67: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

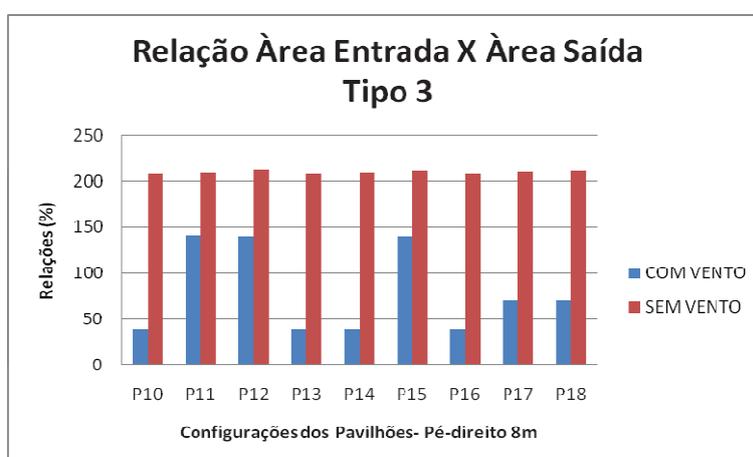


Figura 68: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

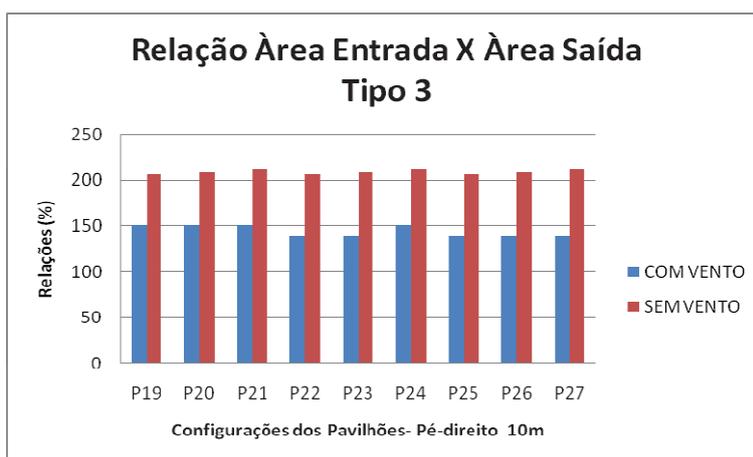


Figura 69: Relação Área Entrada / Área Saída dos modelos ensaiados

4.5 Análises dos resultados

Com base nos resultados e nas figuras ilustradas, de forma geral, observou-se que independentemente das dimensões dos pavilhões estudados o efeito do vento gera um aumento significativo na vazão de ar do pavilhão, resultando na diminuição das áreas mínimas das aberturas e tornando-o mais ventilado. Observou-se que conforme a localização das aberturas nas fachadas há a possibilidade de se projetarem aberturas com dimensões diferentes. O uso da abertura superior, (lanternim) aumenta a eficiência da ventilação através do efeito chaminé, muito utilizado nesta tipologia de pavilhão industrial. Conforme demonstrado nas figuras 43, 44 e 45, as relações entre as áreas das aberturas encontradas pelo uso das planilhas diferem quando se considera ou não o uso do vento.

A primeira relação analisada refere-se ao item da área total das aberturas comparada à área do piso do pavilhão. Analisando os percentuais resultantes para cada modelo, obteve-se:

-Tipo 1- Aberturas de parede e cobertura

Os percentuais encontrados variaram de 2% a 6%, ficando em torno de 3% quando se faz uso do vento e 6% sem a consideração do mesmo.

-Tipo 2- Aberturas de parede opostas

Nas simulações do modelo com aberturas opostas os percentuais variaram de 2% a 17% utilizando ou não o vento. A maior variação ocorre com as dimensões de pé direito de 6 metros, ficando entre 2% e 14%.

-Tipo 3- Aberturas de parede opostas e cobertura

Considerando as aberturas de parede opostas e o uso de ventilação na cobertura, o percentual de área necessária para as aberturas variou entre 3% e 12%.

De forma geral a maioria dos percentuais resultantes nesta relação ficou acima do recomendado pelo código de obras de Passo Fundo. Esta diretriz recomenda que o valor desejável para aberturas em pavilhões seja em torno de 4%. Os valores encontrados para relação Área total das aberturas X Área de piso sugerem a adequação desse parâmetro no dimensionamento das aberturas na fase de projeto.

A análise seguinte relata sobre área total das aberturas e o volume do pavilhão, onde se obteve:

-Tipo 1- Aberturas de parede e cobertura:

Os percentuais encontrados de forma geral variaram de 0,3% a 0,8%. As variações ocorrem com maior diferença nas dimensões que envolvem o pé direito de 6 metros, ficando em torno de 0,3% quando se faz uso do vento e 0,8% sem a consideração do mesmo. Nas dimensões com pé direito de 8 metros ficou entre 0,3% e 0,6%. A menor variação ocorreu no uso de pé direito de 10 metros onde os índices ficaram entre 0,3% e 0,5%.

- Tipo 2- Aberturas de parede opostas

Nas simulações do modelo com aberturas opostas os percentuais atingem valores mínimos e máximos distantes. A variação dos índices utilizando os três valores de pé direito, 6, 8 e 10 metros, ocorre de forma parecida, variando de 0,6% a 2% utilizando ou não o vento.

-Tipo 3- Aberturas de parede opostas e cobertura

Considerando as aberturas de parede opostas e o uso de ventilação na cobertura, o percentual de área necessária para as aberturas variou entre 0,5% e 1,6%. Percebe-se que quando considerado o vento, os índices referentes a todos os dados de pé direito possuem valores próximos, em torno de 0,63%. Já a variação com a ausência do vento, fica entre 1,17% e 1,67%.

Por fim, analisou-se a terceira relação que compreende as áreas de entrada e saída. Utilizando os conceitos encontrados na teoria como embasamento para essa análise, a relação de área de entrada versus área de saída demonstrou que:

-Tipo 1- Aberturas de parede e cobertura:

Os índices encontrados neste modelo de pavilhão variaram entre 1,6% e 11%. Com o uso de vento as áreas de entrada e saída ficam com valores próximos, divergindo quando o mesmo é anulado. Esses resultados indicam que a área de abertura de entrada deve ser maior que a área de saída.

-Tipo 2- Aberturas de parede opostas

Neste caso, as variações nos percentuais resultantes nos cálculos com o uso do vento variam entre 5% a 9%. O percentual encontrado com o uso do vento teve um valor aproximado de 130% para todas as análises nos diferentes modelos, mesmo modificando os dados de pé direito. Este índice alto supera o valor sugerido pelos autores citados anteriormente.

Tipo 3- Aberturas de parede opostas e cobertura

Nesta configuração onde as aberturas de fachada são iguais e há o acréscimo de abertura na cobertura, os índices ficaram entre 40% e 200%. Os valores indicam que as áreas de saída são maiores que as áreas de entrada, o que promove velocidades internas do ar mais elevadas. Conforme cita Givoni (1976), “A combinação de uma entrada pequena com uma saída maior produz um movimento de ar concentrado, o chamado “efeito Venturi”, que possui maior velocidade, mas se torna limitado a uma pequena seção do ambiente”.

5 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

5.1 Considerações Iniciais

Com a finalidade de verificar o comportamento da vazão de ventilação por efeitos dos ventos de forma prática, foram efetuados ensaios em modelo reduzido em túnel de vento. A vazão de ventilação nestes ensaios foi determinada através da medição direta da velocidade nas aberturas utilizando anemômetros de fio quente.

Para que a metodologia estudada fosse aplicada, foi necessário encontrar as áreas mínimas das aberturas de um determinado modelo de pavilhão. Assim, utilizou-se como exemplo o modelo reduzido de pavilhão industrial semelhante ao modelo utilizado por Silvani (2005). Para avaliar a influência da disposição das aberturas na edificação na vazão de ventilação promovida pelo vento, as áreas mínimas das aberturas das janelas foram dispostas nas três configurações estudadas anteriormente.

5.2 Túnel de Vento

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Figura 70) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982). Trata-se de um túnel de vento de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis em operação desde 1977.



Fonte: LAC- Laboratório de Aerodinâmica das Construções

Figura 70: Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

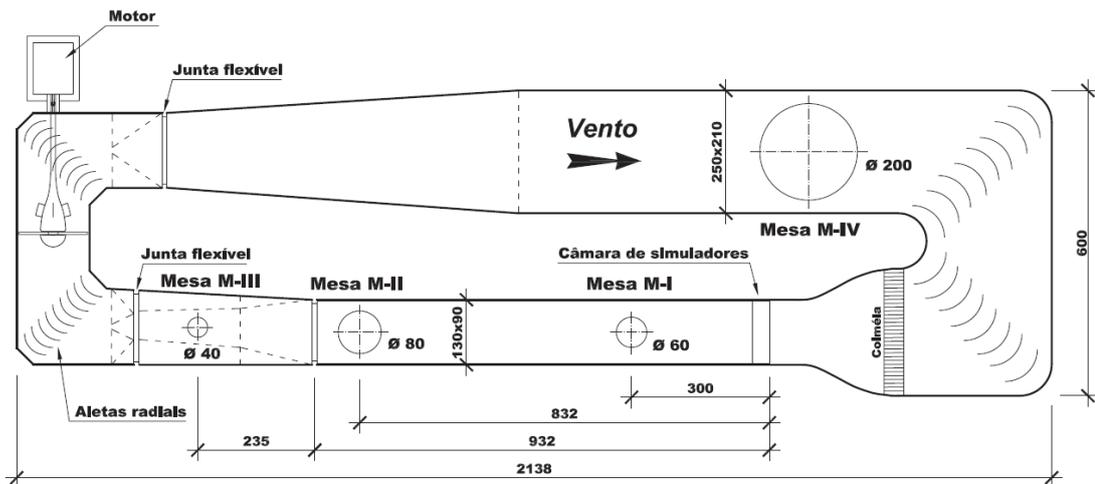
O túnel tem viabilizado, ao longo deste tempo, o desenvolvimento de estudos de efeitos estáticos e dinâmicos sobre edificações civis em geral, além de determinar características dos ventos simulados em outras pesquisas como: efeitos sobre usuários das edificações, efeitos sobre transeuntes, dispersão de poluentes, estudo de características de camada limite, ventilação interna, estudos hidráulicos por via aerodinâmica. (NUNES, 2006)

Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais e possui as seguintes características:

- a) relação comprimento / altura $\approx 10,3$;
- b) dimensões médias = 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento);
- c) velocidade máxima do escoamento com vento uniforme e suave sem a presença de modelos ≈ 44 m/s (160 km/h);
- d) número de Reynolds do túnel = $2,6 \times 10^6$;
- e) potência do motor elétrico que acionam as hélices do ventilador = 100 HP.

O túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos (NUNES, 2006). A localização dessas mesas e outras características físicas do túnel de vento podem ser vistas na figura 71.

- Mesa I: ensaios do tipo aeronáutico, no piso do túnel, em camada limite de pequena espessura e escoamento de baixa turbulência, podem ser feitos ensaios para a indústria da construção com a utilização de geradores de turbulência na câmara de simuladores. Os modelos podem ser colocados tanto na horizontal como na vertical na Mesa I;
- Mesa II: ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaios para a indústria da construção civil com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores ou com jatos transversais;
- Mesa III: esta mesa possui rigidez e foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento;
- Mesa IV: mesa utilizada para ensaios de modelos que necessitam serem reproduzidos em maior escala, ensaios para baixas velocidades do vento.



Fonte: LAC- Laboratório de Aerodinâmica das Construções

Figura 71: Circuito Aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

Os modelos foram ensaiados na mesa M-II submetidos a ventos deslizantes e turbulentos com perfis potenciais de velocidades médias de expoentes $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

O vento simulado com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,11$ corresponde ao terreno com rugosidade de Categoria I da NBR-6123, e tem as seguintes características:

- **Categoria I** – terreno de superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5,0 km de extensão.

Exemplos: mar calmo; lagos, rios e pântanos sem vegetação.

O vento simulado com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$ corresponde a terreno com rugosidade entre as Categorias III e IV da NBR-6123, e tem as seguintes características:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; fazendas com sebes e/ou muros; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m.

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizados.

Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V (NUNES, 2006).

5.3 Anemometria de Fio Quente

A anemometria térmica é uma técnica baseada na transferência de calor por convecção de um elemento quente, exposto a um escoamento de um fluido. O anemômetro de fio quente é um instrumento de medição utilizado na investigação e análise de escoamentos de líquidos e gases, ou seja, um transdutor térmico, capaz de converter variações de temperatura em sinais elétricos. Os anemômetros diferem entre si de acordo com o seu princípio de funcionamento, geometria, material de seu elemento sensor e tipos de sonda utilizados (NUNES, 2006).

O sensor de um anemômetro a fio quente é constituído de tungstênio com uma cobertura de platina cujo diâmetro é da ordem de μm , o qual através de hastes é exposto ao movimento de um fluido. Neste trabalho foi utilizado o anemômetro *StreamLine*, da *Dantec Dynamics*, para medições das velocidades instantâneas do vento. A sonda usada consiste em um fio-quente modelo 55P11 (fio reto), com filamento de tungstênio coberto com platina, de $5\mu\text{m}$ de diâmetro e 1,25mm de comprimento (figura 72). O sistema foi controlado pelo software *StreamWare* (*Dantec Dynamics*), que através da placa de aquisição PCI – MIO 16E-4 da *National Instruments*, possibilitou a conversão dos dados de tensão, medidos pelo fio-quente, em velocidades do vento [m/s] de acordo com a curva de calibração.



Figura 72: Sonda utilizada modelo 55P11 (fio reto)

O anemômetro de fio quente requer a calibração do sensor a ser utilizado na medição, que consiste em determinar a relação entre a tensão de saída da ponte e a velocidade do escoamento. Esta relação pode ser descrita mediante o ajuste de uma função conveniente. O processo de calibração requer um dispositivo e um programa de ajuste que calcule as constantes de cada sonda. O aparelho de calibração dispõe de um bocal de descarga calibrado, que permite obter escoamentos estáveis a distintas velocidades. A sonda anemométrica é montada sobre esse bocal conforme figura 73 (NUNES, 2006).

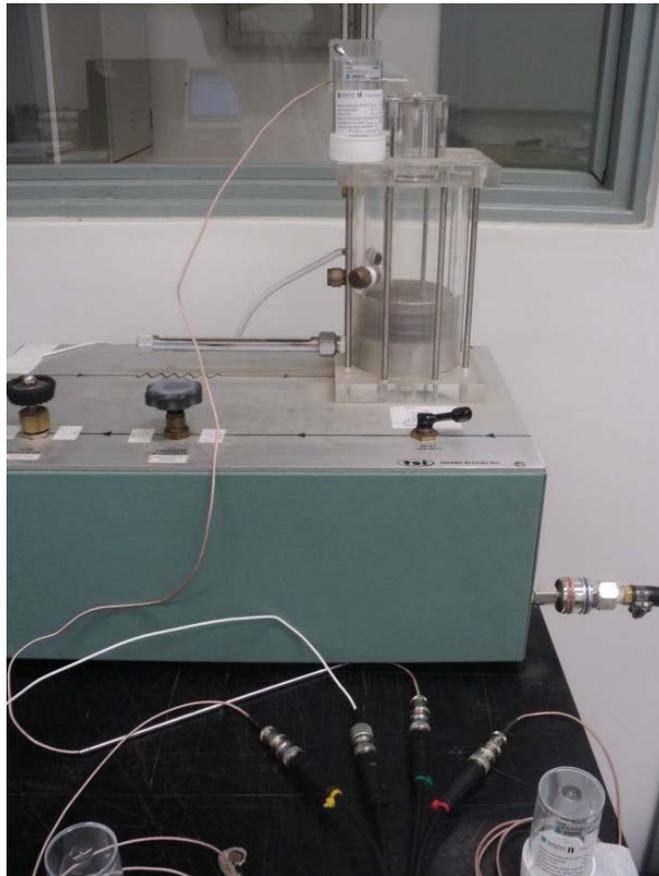


Figura 73: Calibração da sonda

5.4 Velocidade média do vento no ponto de referência (V_{ref})

O ponto escolhido como referência do modelo com aberturas para a determinação da velocidade média do vento está localizado no eixo de simetria da seção principal da mesa de ensaio na altura em escala (63mm) correspondente a 12,58m, na cumeeira do protótipo (NUNES, 2006). A velocidade média no ponto de referência foi determinada usando-se a expressão:

$$V_{ref} = \sqrt{2 \frac{q_{ref}}{\rho_{ar}}} \quad (56)$$

onde:

$$q_{\text{ref}} = k_{(z_{\text{ref}})} \Delta p_a \text{ (N/m}^2\text{)};$$

$k_{(z_{\text{ref}})}$ = parâmetro obtido da correlação para a cota em escala correspondente a 12,58 metros do protótipo, z_{ref} (adimensional);

Δp_a = pressão diferencial registrada entre os anéis piezométricos durante os ensaios (N/m²);

5.5 Velocidades adimensionais pontuais no centro das aberturas (V_{adm})

As velocidades médias pontuais obtidas através da medição anemométrica, em cada abertura, foram adimensionalizadas com as velocidades médias do vento no ponto de referência (NUNES, 2006). As velocidades adimensionais foram determinadas pela seguinte equação:

$$V_{\text{adm}} = \frac{V_{\text{anem}}}{V_{\text{ref}}} \quad (57)$$

sendo:

V_{adm} = velocidade adimensional média pontual na abertura;

V_{ref} = velocidade média do vento no ponto de referência – (equação 53) (m/s);

V_{anem} = velocidade média pontual na abertura obtida através dos anemômetros (m/s).

5.6 Determinação da vazão de ar nas aberturas

A utilização do anemômetro de fio quente permite encontrar valores para as velocidades pontuais. Com isso, é possível explorar as velocidades locais de vários pontos de uma abertura, segundo uma metodologia apropriada, e deduzir a vazão, mesmo considerando que o escoamento do ar difere quando comparado no centro e nas bordas das aberturas (NUNES, 2006).

Conhecendo-se a velocidade no centro ou deduzindo-se a velocidade média a partir da média das velocidades ao longo de uma abertura, pode-se determinar o perfil das velocidades em função do número de Reynolds.

A média das velocidades obtidas nos anemômetros de fio quente é calculada a partir do levantamento das velocidades tomadas em intervalos regulares ao longo de cada abertura. Conforme a equação de Bernoulli, a velocidade média do ar que passa por uma abertura é dada por:

$$V_{\text{média}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{\text{ar}}}} \quad (58)$$

Sendo:

Δp = diferencial de pressão através do orifício (Pa);

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

A vazão teórica é expressa por:

$$Q_{teórica} = A \cdot V_{média} \quad (59)$$

Sendo:

A = área da abertura (m²)

$V_{média}$ = velocidade média do ar que passa por uma abertura (m/s)

Contudo, para se obter a vazão real, deve-se considerar um coeficiente de vazão, K_v . Este coeficiente descreve a relação entre o diferencial de pressão através da abertura e a vazão de ar que passa através dela (NUNES, 2006). Em outras palavras, K_v é uma medida de eficiência das aberturas a passagem de ar:

$$K_v = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} \quad (60)$$

5.7 Ensaios

Esta etapa consistiu em determinar a vazão de ar através da medição direta de velocidades utilizando anemômetros de fio quente em algumas aberturas do modelo em escala reduzida (1:200) do pavilhão industrial utilizado como protótipo. Foram analisadas as alterações das velocidades do escoamento de ar nas aberturas do modelo quando o perfil de velocidades médias do túnel era mudado, bem como as alterações provocadas pelo fechamento das aberturas.

5.7.1 Descrição do modelo

O modelo do pavilhão industrial utilizado nos ensaios, com escala 1:200, foi confeccionado em material acrílico com espessura de 2mm. O exaustor natural de cumeeira foi executado em chapa metálica, com detalhes mais precisos da abertura. Todas as aberturas existentes no modelo foram reproduzidas com vãos livres para a passagem do escoamento, com exceção dos portões que foram considerados fechados (figura 74).

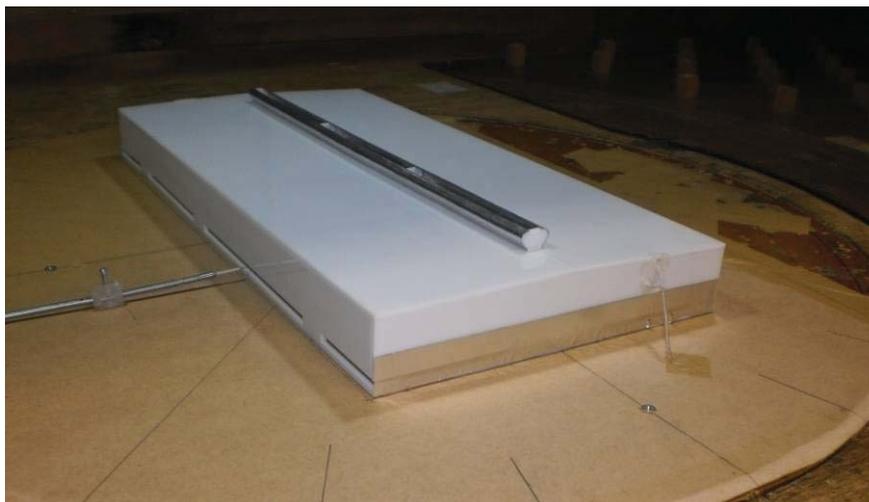


Figura 74: Modelo do pavilhão industrial com as aberturas livres para passagem do escoamento

As áreas das aberturas otimizadas dimensionadas no modelo do pavilhão ensaiado foram encontradas utilizando a formulação proposta por Clezar e Nogueira (1999) descrita na planilha Excel. Com isso, posicionou-se uma sonda em cada uma das três principais aberturas do modelo, sonda 3 = abertura 3, sonda 2= abertura 2 e sonda 1= abertura 1 respectivamente, sendo que as medições foram realizadas de forma simultânea para as três sondas (figura 75). O fio aquecido foi posicionado perpendicularmente ao escoamento de cada abertura, permitindo medir as velocidades médias pontuais de entrada ou saída de ar (figura 76).

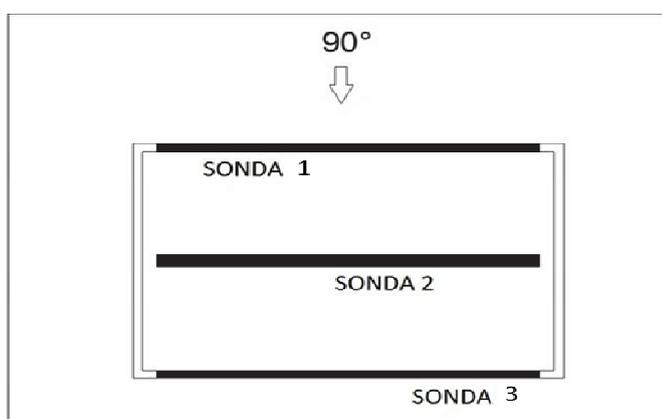


Figura 75: Planta baixa do pavilhão- localização das sondas

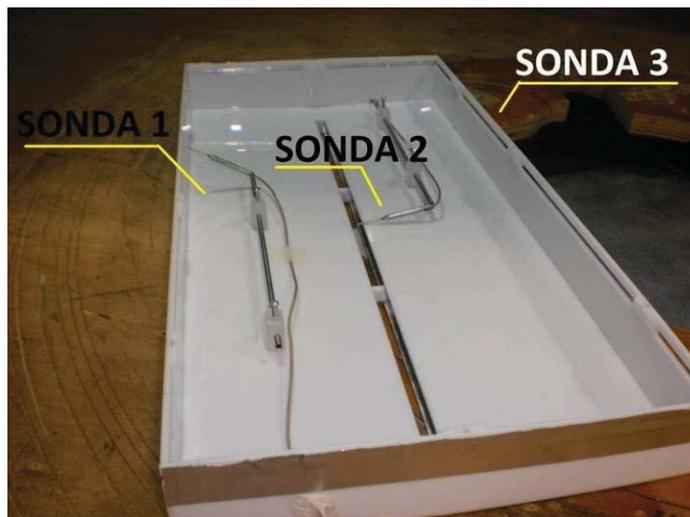


Figura 76: Modelo do pavilhão- localização das sondas

Com o posicionamento das sondas, foram ensaiadas três configurações de fechamento de aberturas descritas a seguir.

CONFIGURAÇÃO 01-

Aberturas de parede e cobertura: Modelo de pavilhão com duas aberturas, sendo uma abertura inferior localizada na fachada a barlavento para o ângulo de 90° e outra abertura superior como exaustor de cumeeira (figura 77).

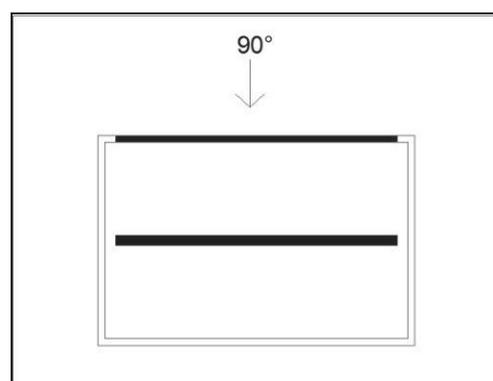


Figura 77: Planta baixa da configuração 1

CONFIGURAÇÃO 02-

Aberturas opostas de paredes: Modelo de pavilhão com duas aberturas localizadas nas fachadas a sotavento e a barlavento para o ângulo de 90° (figura 78).

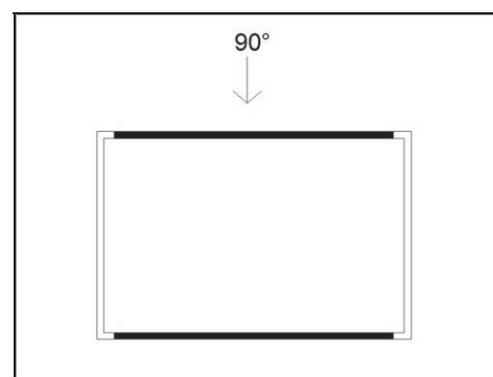


Figura 78: Planta baixa da configuração 2

CONFIGURAÇÃO 03-**Aberturas opostas de paredes e cobertura:**

Modelo de pavilhão com três aberturas, sendo duas aberturas localizadas nas fachadas a sotavento e a barlavento para o ângulo de 90° e uma abertura superior como exaustor de cumeeira (figura 79).

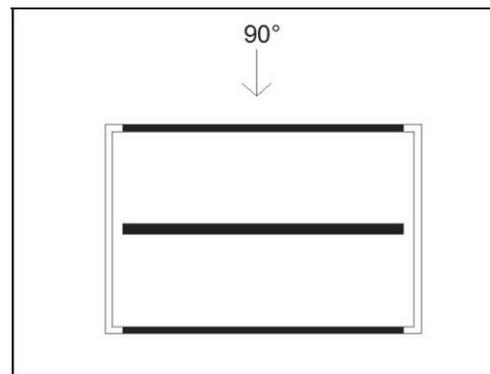


Figura 79: Planta baixa da configuração 3

O fechamento das aberturas do modelo foi realizado fixando-se fita de alumínio, conforme figura 80.



Figura 80: Fechamento das aberturas do modelo com fita de alumínio.

Para cada uma das três configurações descritas foram simulados dois tipos de vento, com perfil de velocidades médias horárias, $p = 0,11$ e $p = 0,23$, correspondentes às categorias rugosidade superficial (tipo de terreno) I e III/IV da Norma NBR-6123, sendo que para cada tipo de vento simulado foram ensaiadas duas velocidades médias de escoamento no túnel, uma velocidade com as aletas do túnel totalmente abertas (V1) e outra com as aletas do túnel parcialmente abertas (V2). O ensaios foram realizados com o modelo fixado a mesa giratória M-II, na câmara de ensaios, para o ângulo de 90° , obtendo com isso as velocidades médias pontuais no centro das aberturas onde foram posicionadas as sondas (anemômetro de fio aquecido).

As tabelas 10 a 15 apresentam os valores das velocidades pontuais obtidos através do processamento dos resultados das velocidades médias pontuais no centro das aberturas (sondas 1,2

e 3), referentes às fachadas opostas e cobertura, com incidência do vento a 90° e suas respectivas velocidades adimensionais para vento $p = 0,11$ e $p = 0,23$.

Para a determinação da vazão de ventilação nas aberturas a barlavento do pavilhão utilizando os resultados obtidos dos ensaios com os anemômetros de fio quente nas aberturas do modelo, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- A vazão de ventilação nas aberturas foi determinada através da equação 57, considerando como coeficiente de vazão, $K_v = 0,613$ para vento $p = 0,11$ e $K_v = 0,410$ para vento $p = 0,23$;
- As velocidades médias adimensionais nas aberturas do modelo em escala reduzida foram consideradas iguais as médias das velocidades adimensionais pontuais obtidas nas medições realizadas com os anemômetros;
- As velocidades médias nas aberturas do pavilhão industrial utilizado como modelo foram determinadas através da multiplicação das velocidades médias adimensionais das aberturas do modelo em escala reduzida pela velocidade média do vento para o protótipo;
- A velocidade do vento foi considerada igual a 2m/s para uma velocidade do vento correspondente a 50% da velocidade média sazonal para o protótipo. Essa velocidade média igual a 4m/s foi obtido dos registros da Embrapa Trigo-Passo Fundo, correspondentes aos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, durante o período de 1977 a 1994 (EMBRAPA, 2004).

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel V_{ref} (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/V_{ref}
1	15,33 (V1)	10,83	0,70
2	15,33 (V1)	1,28	0,08
3	15,33 (V1)	4,76	0,31
1	9,61 (V2)	6,56	0,68
2	9,61 (V2)	0,48	0,05
3	9,61 (V2)	2,64	0,27

Tabela 10 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 1 para vento $p = 0,11$

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel Vref (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/ Vref
1	11,93 (V1)	9,21	0,77
2	11,93 (V1)	1,16	0,09
3	11,93 (V1)	3,74	0,31
1	7,52 (V2)	6,56	0,68
2	7,52 (V2)	0,48	0,05
3	7,52 (V2)	2,64	0,27

Tabela 11 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 1 para vento $p = 0,23$

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel Vref (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/ Vref
1	15,33 (V1)	10,07	0,65
2	15,33 (V1)	7,90	0,51
3	15,33 (V1)	0	0
1	9,61 (V2)	6,03	0,62
2	9,61 (V2)	4,59	0,47
3	9,61 (V2)	0	0

Tabela 12 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 2 para vento $p = 0,11$

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel Vref (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/ Vref
1	11,95 (V1)	8,63	0,72
2	11,95 (V1)	6,31	0,52
3	11,95 (V1)	0	0
1	7,53 (V2)	5,20	0,69
2	7,53 (V2)	0	0
3	7,53 (V2)	0	0

Tabela 13 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 2 para vento $p = 0,23$

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel Vref (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/ Vref
1	15,34 (V1)	12,75	0,83
2	15,34 (V1)	3,70	0,24
3	15,34 (V1)	3,48	0,22
1	9,59 (V2)	7,96	0,82
2	9,59 (V2)	1,87	0,19
3	9,59 (V2)	1,73	0,18

Tabela 14 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 3 para vento $p = 0,11$

Posição da Sonda	Velocidade de referência no túnel Vref (m/s)	Velocidade média pontual V (m/s)	Velocidade Adimensional Pontual V/ Vref
1	11,95 (V1)	11,02	0,92
2	11,95 (V1)	2,60	0,21
3	11,95 (V1)	2,73	0,22
1	7,52 (V2)	6,67	0,88
2	7,52 (V2)	1,08	0,14
3	7,52 (V2)	1,25	0,16

Tabela 15 Resultados das velocidades obtidas para pavilhão com configuração 3 para vento $p = 0,23$

Nas tabelas 16 a 18 são apresentadas as vazões de ar nas aberturas situadas nas fachadas a barlavento do pavilhão, obtidas através das velocidades adimensionais determinadas nos ensaios com a utilização do anemômetro de fio quente para vento simulado $p=0,11$ e $p = 0,23$ com incidência a 90° e velocidade média do vento igual a 2m/s. As aberturas do pavilhão estão posicionadas conforme as figuras 81, 82, 83.

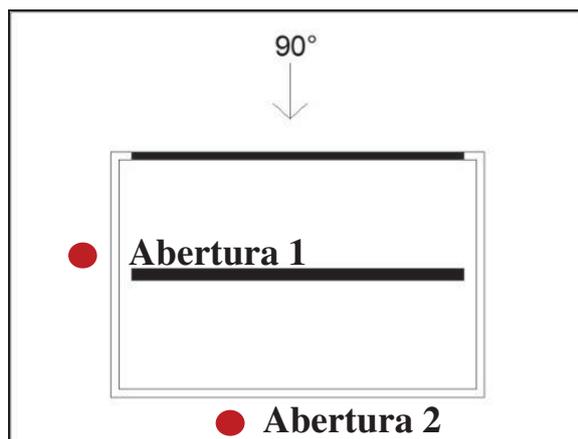


Figura 81: Posição das aberturas no pavilhão 1 – planta baixa

Vento	Posição da abertura no pavilhão	Kv	Área da abertura A (m ²)	Velocidade média na abertura V (m/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)
$p = 0,11$	1	0,613	70,19	6,562	282,33
	2	0,613	71,79	0,485	21,34
$p = 0,23$	1	0,410	70,19	5,667	163,08
	2	0,410	71,79	0,393	11,56

Tabela 16 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 1 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s

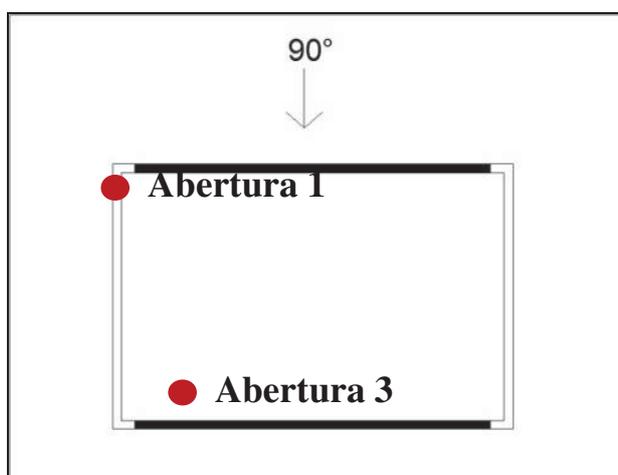


Figura 82: Posição das aberturas no pavilhão 2 – planta baixa

Vento	Posição da abertura no pavilhão	Kv	Área da abertura A (m ²)	Velocidade média na abertura V (m/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)
p = 0,11	1	0,613	126,23	6,033	466,82
	3	0,613	126,23	0	0
p = 0,23	1	0,410	126,23	5,206	269,43
	3	0,410	126,23	0	0

Tabela 17 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 2 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s

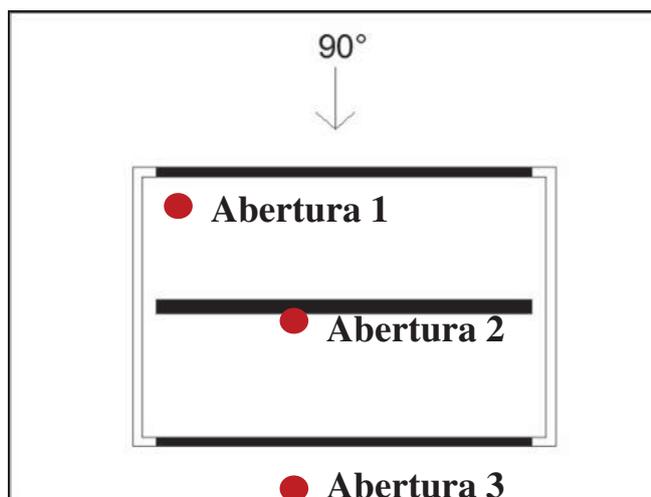


Figura 83: Posição das aberturas no pavilhão 2 – planta baixa

Vento	Posição da abertura no pavilhão	Kv	Área da abertura A (m ²)	Velocidade média na abertura V (m/s)	Vazão de ar Q (m ³ /s)
p = 0,11	1	0,613	90	7,963	439,31
	2	0,613	67,65	1,877	77,86
	3	0,613	90	1,733	95,60
p = 0,23	1	0,410	90	6,673	246,23
	2	0,410	67,65	1,086	30,13
	3	0,410	90	1,254	46,27

Tabela 18 Vazões de ar nas aberturas do pavilhão com configuração 3 para vento simulado $p = 0,11$ e $p = 0,23$ e velocidade média do vento igual a 2m/s

De forma geral, observa-se nas tabelas 16 a 18 que a rugosidade do terreno influencia diretamente na velocidade e consequentemente na vazão de ventilação. Conforme observou-se ocorreram variações nas velocidades médias pontuais obtidas nos três modelos de pavilhões. As variações podem ter sido ocasionadas pela diferença no posicionamento das sondas do anemômetro e confecção das aberturas. A metodologia que utiliza a medição direta de velocidades limita a dependência da exatidão na confecção das aberturas do modelo, bem como o posicionamento dos anemômetros para medição.

Nas tabelas 19 e 20 são comparadas as áreas das aberturas de entrada e saída do pavilhão industrial, obtidas através do modelo teórico proposto por Clezar e Nogueira (1999) e das velocidades adimensionais determinadas com o emprego dos anemômetros de fio quente utilizando os dados descritos anteriormente. Compararam-se os valores encontrados apenas com o vento simulado $p=0,11$,

que com o coeficiente de vazão, $K_v = 0,613$. Optou-se por este dado porque está mais próximo do coeficiente utilizado nas iterações nas planilhas ($K = 0,60$).

Como critério de estabelecimento da vazão de ar necessária, parâmetro principal para as análises nas planilhas utilizando o método de Clezar e Nogueira (1999), optou-se pelo cálculo do número de trocas de ar que utiliza o volume do ambiente, o qual permite uma vazão de ar total.

No caso dos ensaios no túnel de vento, é possível calcular a vazão de ar em cada abertura. Assim, para fins comparativos utilizaram-se as áreas de entrada e saída e suas respectivas vazões, encontradas pelas iterações da planilha do método de Clezar e Nogueira (1999) e nos ensaios do túnel de vento. Observa-se que os valores positivos das vazões correspondem a aberturas com ingresso de ar e valores negativos correspondem a aberturas com saída de ar.

Método de Clezar e Nogueira (1999)				
Configuração do Pavilhão	Área Entrada (m²)	Vazão de ar Entrada Q (m³/s)	Área Saída (m²)	Vazão de ar Saída Q (m³/s)
1	70,19	118,31	71,79	- 122,20
2	126,33	118,32	126,33	122,22
3	90,00	118,31	157,67	- 121,20

Tabela 19 Áreas e Vazões de ar nas aberturas do pavilhão encontradas com o método de Clezar e Nogueira (1999)

Ensaio Túnel de Vento				
Configuração do Pavilhão	Área Entrada (m²)	Vazão de ar Entrada Q (m³/s)	Área Saída (m²)	Vazão de ar Saída Q (m³/s)
1	70,19	282,33	71,79	21,34
2	126,33	466,82	126,33	0
3	90,00	439,31	157,67	173,46

Tabela 20 Áreas e Vazões de ar nas aberturas do pavilhão encontradas com o ensaio do túnel de vento

Com o fechamento de algumas aberturas do pavilhão nos ensaios no túnel de vento, ocorreram alterações nas vazões de ar. Percebe-se que à medida que as aberturas vão sendo fechadas, a vazão de ventilação diminui. Os exaustores de cumeeira (lanternins) são normalmente associados à ventilação promovida pela diferença de temperatura (efeito chaminé) auxiliando a ventilação promovida pelo efeito do vento. Conforme mostra a tabela 18, na configuração 2 ocorreu uma expressiva diminuição da vazão ao considerar o exaustor de cumeeira do pavilhão fechado.

Com a análise comparativa, observou-se que as vazões de ar, parâmetro inicial encontrado através do cálculo do número de trocas de ar e volume do pavilhão, utilizadas nas iterações pelo método teórico de Clezar e Nogueira (1999) são menores que as encontradas através dos ensaios em túnel de vento. Isso ocorre porque nos ensaios em métodos reduzidos é possível chegar bem próximo das características reais do ambiente onde a edificação está inserida.

O modelo de pavilhão industrial simulado através do método de Clezar e Nogueira (1999) possui as áreas de entrada e saída diferentes. Isso resultou em vazões próximas devido ao volume do pavilhão ser o mesmo. A ventilação natural por efeito dos ventos nas edificações tem sua eficiência alterada devido ao número, posição, tipo e tamanho das aberturas existentes para a passagem de ar.

Já o ensaio do mesmo pavilhão industrial no túnel de vento, resultou em vazões diferentes devido às variações de magnitude da velocidade média do vento no túnel. Destaca-se que dependendo da posição da abertura do modelo, as velocidades adimensionais não são proporcionais à magnitude da velocidade média de escoamento no túnel. As velocidades de entrada e saída de ar nas aberturas dependem do tipo de vento simulado, da magnitude da velocidade do vento, da posição das aberturas e da configuração de fechamento das aberturas da edificação em questão.

6 CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados neste trabalho e da análise dos mesmos pode-se concluir que:

- O emprego de técnicas de otimização pode contribuir na determinação de parâmetros de projeto que visem melhorar o desempenho térmico da edificação;
- O suplemento Microsoft Excel Solver consiste numa ferramenta de fácil obtenção e utilização, permitindo que a aplicação da metodologia desenvolvida seja efetuada de forma simples;
- Os modelos teóricos analisados apresentam significativa dispersão de resultados, sendo indicados os modelos que se baseiam na diferença de pressões externas e internas, como o modelo de Clezar e Nogueira (1999). Essas diferenças também já haviam sido constatadas por Silvani (2005);

Com relação aos resultados das simulações numéricas efetuadas, têm-se que:

-Uma maior distância vertical entre as aberturas proporciona uma maior taxa de ventilação. Neste sentido, as aberturas localizadas nas cumeeiras são fatores importantes na ventilação promovida pela diferença de temperatura (efeito chaminé), e possuem fundamental importância para a ventilação promovida pelo vento pois permitem a diminuição dos vãos nas aberturas.

-As análises das relações entre as áreas encontradas e as dimensões dos pavilhões estão parcialmente de acordo com valores propostos pelo código de obras de Passo Fundo;

-Os valores encontrados para a relação Área de entrada X Área de saída sugerem que a área de abertura de entrada deve ser maior que a área de saída, em concordância com as indicações propostas pela literatura técnica;

-A variação dos índices utilizando os três valores de pé direito, 6, 8 e 10 metros, na relação Área total das aberturas X Volume ocorre de forma semelhante, considerando ou não o efeito do vento. Percebe-se que, quando considerado o vento, os índices referentes a todos os dados de pé direito possuem valores próximos, diferindo com a ausência do vento;

Relativamente às simulações em túnel de vento, pode-se concluir que a metodologia de medição direta de velocidades através de anemômetro de fio quente permite que se obtenham vazões de ventilação sem iterações. Além disso, observa-se que as velocidades de entrada ou saída

de ar nas aberturas dependem do perfil do vento, magnitude da velocidade do vento, da posição e dimensionamento das aberturas em pavilhões.

Sugere-se como aplicação futura o uso da metodologia elaborada neste trabalho como modelo para o desenvolvimento de ensaios em outras tipologias como edificações de pequeno e grande porte, como escolas e residências, utilizando a ventilação natural para o dimensionamento das aberturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, Francis. **Natural ventilation in buildings – A design handbook**. London, James & James, 1998.

ALLOCA, C., CHEN, Q., GLICKSMAN, L. R. **Design analysis of single-sided natural ventilation**. Energy and Buildings, v. 35, p. 785-795, 2003.

ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003. Brasília, 2003.

ARAÚJO, V.M.D. **Parâmetros de conforto térmico para usuários de edificações escolares no litoral nordestino brasileiro**. São Paulo. Dissertação. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 1996.

AROSZTEGUI, José Miguel. **Desempenho térmico de janelas**. 1984. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, 1984.

ASFOUR, Omar S.; GADI, Mohamed B. **Using CFD next term to investigate previous term ventilation next term characteristics of vaults as wind-inducing devices in buildings**. Applied Energy. 15, 2007

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220. **Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. São Paulo, 1988.

_____. NBR 6401: Instalações Centrais De Ar Condicionado Para Conforto- Parâmetros Básicos De Projeto. Rio de Janeiro. 1980.

AYNSLEY, R. M. **Unresolved issues in natural ventilation for thermal comfort** In: INTERNATIONAL ONE DAY FORUM ON NATURAL AND HYBRID VENTILATION, 1999, Sydney. Technical Paper... Sydney, 1999.

BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christina. **Introdução a ventilação natural**. Maceió, EdUFAL, 2008.

BLESSMANN, J. **The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10.pp. 231-248, 1982.

BOUHLAGHEM, N, **Otimização numérica aplicada à concepção térmica dos edifícios**. Tese (Doutorado em Engenharia) University of Manchester Institute of Science and Technology, 1990.

CALDAS, L.G; NORFORD, L.K.. **A design optimization tool based on a genetic algorithm**. Automation in Construction, 2002.

CAMPONOGARA, Eduardo. **Métodos de otimização: teoria e pratica**. Florianópolis: UFSC.2006.

CHÁVEZ, José Roberto García; FREIXANET, Víctor Fuentes. **Viento y arquitectura: el viento como factor de diseño arquitectónico**. México: Trillas, 1995.

CHEN, Qingyan. **Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications**. Building and Environment. 1-11, 2008.

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

CORRAR, Luis João; GARCIA, Editinete A. da Rocha. **Programação linear: uma aplicação à contabilidade de custos no processo de tomada de decisão**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CUSTOS, 2001, León. Disponível em <<http://www.intercostos.org/documentos/Trabajo066.pdf>>. Acesso em 01/12/2010.

COSTA, Ennio Cruz da. **Ventilação**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

COTTING, René. **Barriers to natural ventilation design of office buildings**. First report of NatVent Project – Joule Programme. Switzerland, 1998.

CUNHA, Leonardo Jorge Brasil de Freitas. **Análise de métodos para aplicação de ventilação natural para projeto de edificações em Natal-RN**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010

EIRAS, S.; ANDRADE J.C. **O uso do simplex modificado como estratégia de otimização em química analítica**. Química Nova, 1996.

EMBRAPA, **Embrapa Trigo de Passo Fundo**. Disponível em: < <http://www.cnpt.embrapa.br/>>. Acesso em 14 de jul. 2011.

EMMERICH, Steven J ; DOSL, W. Stuart ; AXLEY, James W. **Natural ventilation review and plan for design and analysis tools**. NIST National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce, 2001.

FANGER, P. O. **Thermal comfort**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

FREITAS, Ruskin Marinho de. **Entre mitos e limites: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2005.

FROTA, A. B. **Ventilação de edifícios industriais: modelos paramétricos 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**. 2. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

_____. **Ventilação Natural**. São Paulo. 2000.

GASPAR, P. D.; BARROCA, R. .; PITARMA, R. A. **Performance evaluation of CFD Codes in Building Energy and Environmental Analysis.** In: BUILDING SIMULATION, 8., 2003, Eindhoven. Anais... Eindhoven, 2003.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture.** London, Elsevier, Applied Science Publishers: 1976.

GOLDBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.** Addison-Wesley Publishing, 1989.

GRAÇA, Valéria Azzi Collet da. **Otimização de projetos arquitetônicos considerando parâmetros de conforto ambiental: o caso das escolas de rede Estadual de São Paulo ,2002.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, 2002.

GRILLO, José Carlos ; AMORIM, Cláudia Naves. **Janela na edificação: normas e indicações para projeto.** 2004. [Artigo científico]. Disponível em:<<http://vsites.unb.br/fau/qualilumi/arquivos/janela.pdf>>. Acesso em: 18 agosto. 2011.

GUARESCHI, Maristela. **Avaliação do desempenho térmico de edificações desportivas na cidade de Santa Maria – RS. 2008.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria.Santa Maria, RS, 2008.

GUERRA, Paulo Agostinho. **Silos metálicos prismáticos: Otimização estrutural das paredes em seção trapezoidal e ziguezague. 2006.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, 2006.

JEDRZEJUK, H; MARKS, W. **Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source.** Basic theory, Building and Environment, vol. 37, 2002.

KLANN, Roberto; et al. **Utilização da Programação Linear na Otimização de Resultados de uma Empresa do Ramo de Transporte Rodoviário de Cargas.** [artigo científico]. Disponível em: <http://www.unisinos.br/abcustos/_pdf/190.pdf>. Acesso em 01/12/2010.

KRONKA, M. R. C. **Arquitetura, sustentabilidade e meio ambiente.** Revista Técnica, São Paulo, v. 55, n. outubro, p. 66-69, 2001.

LAMBERTS, R. et al. **Desempenho térmico de edificações.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

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

MASCARO, L. (1991). **Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo.** 2.ed. São Paulo: Projeto.

MATOS, Michele; WESTPHAL, Fernando; LAMBERTS, Roberto. **Análise de área de abertura para ventilação na cidade de Florianópolis utilizando o programa COMIS/Energy Plus.** In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.

MENDELL, M.J. at al. **Elevated symptom prevalence associated with ventilation type in office building.** Epidemiology, 1996.

MENDONÇA, R. S. R.; ASSIS, E. S. **Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte, MG.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre: ANTAC, v.3, n. 3, p. 45-63, 2003.

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

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Edificações – Norma Regulamentadora 8: NR 8.** Portaria GM n 3.214, de 08 de junho de 1978.

NELDER, J.A; MEAD, R.A. **Simplex method for function minimization.** Computer Journal, vol 7, 1965.

NEVES, F. A., **Programação com multi-objetivos aplicada à otimização do projeto de pontes estaiadas.** Tese (Doutorado)- COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

NEVES, Letícia; ASSIS, Rosana. **Arquitetura bioclimática e a obra de Severiano Porto.** In: ENCAC, VII, Maceió, 2005. Anais do VII ENCAC: ANTAC, 2005.

OLIVEIRA, M.C.A.; LABAKI, L.C. **Os primeiros estudos sobre conforto térmico no Brasil:A contribuição de Paulo Sá.** In: ENCAC/COTEDI 2001 – VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2001, São Pedro/SP. Anais...Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 2001, p.1-8.

PAIVA, Anderson Paulo de. **Metodologia de superfície de resposta e análise de componentes principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Itajubá, 2006.

PEDERSEN, Frank. **A method for optimizing the performance of buildings, 2006.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2006.

PEDRINI, Aldomar. **Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office Buildings in Warm Climate. 2003.** Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade de Queensland, Queensland, 2003.

PEDRINI, Aldomar.; SZOKOLAY, S. **The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the Importance of Design Methods.** In: BUILDING SIMULATION, 9., 2005, Montreal. Anais... Montreal, 2005.

PROCEL. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.** Canal do consumidor. Consumo de Eletrodomésticos. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/procel>>. Acesso em: novembro, 2010.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e Clima: Acondicionamento térmico natural.** 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1985.

RODRIGUES, L. S. **Ventilação natural induzida pela ação combinada do vento e da temperatura em edificações.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.

Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2008.

ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília, Ed.UnB, 2001.

ROSAL, M. C. F. **Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

SARAIVA, J. A. G. et al. **Túnel aerodinâmico: CRN - INPE** (Natal-RN). Natal, 2007.

SCIGLIANO, S., HOLLO, V. **IVN - Índice de ventilação natural**. 2001. São Paulo: Editora Pini, 2001. 279 p.

SHAMBLIN, James E. e STEVENS JR., G.T. **Pesquisa Operacional, Uma Abordagem Básica**. São Paulo: Atlas, 1979

SILVA, E. C. N., **Otimização Aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. EPUSP. São Paulo, 2006.

SILVA, Luiz Bueno da. **Análise da relação entre produtividade e o conforto térmico: o caso dos digitadores do centro de processamento de dados e cobrança da caixa econômica federal do estado de Pernambuco**. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis-SC, 2001.

SILVANI, M. **Subsídios para o projeto da ventilação natural em pavilhões industriais**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

SOLVER, INC. **Solver tutorial for optimization users**. Disponível em:<<http://www.solver.com/tutorial.htm>>. Acesso em: 10 jul 2011.

STEPHAN, Louis. et al. **Ensuring desired natural ventilation rate by means of optimized openings**. 2009. [artigo científico]. Disponível em:<http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_2282_2288.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2011.

SOUZA, H. A; MAZON, A. A.; SILVA, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. **Ventilação natural em galpões: o uso de lanternins nas coberturas**. Revista da Escola de Minas, v.59, p. 179-184, 2006.

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

TRINDADE, S.C. **Simulação computacional como ferramenta de auxílio a projeto: aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de natal/rn**.2006. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

TRINDADE, Sileno Cirne; PEDRINI, Aldomar; DUARTE, Raimundo N. C. **Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido**. 2010. [Artigo científico]. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/12110>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS. 2009.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)- Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,SC, 2009.

WOLFE ,P. **Methods of nonlinear programming.** Recent Advances in Mathematical Programming (R.L.Graves e P. Wolfe eds.), McGraw Hill, New York,1963.

XAVIER, Antonio Augusto de Paula. **Condições de Conforto Térmico para Estudantes de 2º Grau na Região de Florianópolis.** Florianópolis- SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.