

**DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DA VIZINHANÇA
NA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO
NATURAL EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Gustavo Menna Barreto Klein

**Porto Alegre
Outubro 2012**

GUSTAVO MENNA BARRETO KLEIN

**DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DA VIZINHANÇA
NA EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO
NATURAL EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico.

Porto Alegre

Outubro 2012

KLEIN, Gustavo Menna Barreto

Determinação dos Efeitos da Vizinhança na Eficiência dos Sistemas de Ventilação Natural em Pavilhões Industriais / Gustavo Menna Barreto Klein. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2012.

93 p.

Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza.

1. Ventilação natural. 2. Efeito do vento. 3. Pavilhões industriais. 4. Interferência de vizinhança. 5. Modelos experimentais.

CCAA2

GUSTAVO MENNA BARRETO KLEIN

**DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DA VIZINHANÇA NA EFICIÊNCIA
DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL EM PAVILHÕES
INDUSTRIAIS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de outubro de 2012

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza

Ph.D, *University of Western Ontario*, Canadá
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Prof. José Luis Vital de Brito (UnB)

Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. D.Sc. Adrian Roberto Wittwer (UNNE)

Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

D.Sc. Mário Gustavo Klaus Oliveira (UFRGS)

Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.a Ângela Borges Masuero (UFRGS)

Dra., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*I whose ambition leads me not only farther than any
other man has been before me, but as far as I think
possible for man to go...*

Journals of Captain James Cook, volume II 1774.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Acir Mércio Loredou-Souza pela amizade, confiança e apoio dedicados nos últimos anos.

Agradeço ao amigo e colega Roges de Mari, funcionário do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela dedicação na confecção dos modelos e ajuda na execução dos ensaios.

Agradeço aos colegas do LAC pela amizade construída ao longo dos anos de convívio durante o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à minha esposa, Analucia Vieira Fantin, pelo carinho, compreensão e incentivo nos momentos difíceis.

Agradeço e dedico essa dissertação ao meu pai, Dario Lauro Klein, cuja trajetória profissional e acadêmica foram e serão sempre exemplo e inspiração ao meu trabalho.

RESUMO

KLEIN, G. M. B. **Determinação dos Efeitos da Vizinhança na Eficiência dos Sistemas de Ventilação Natural em Pavilhões Industriais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Criar fontes alternativas de produção de energia, que não dependam principalmente do consumo de combustíveis fósseis, é o desafio do século XXI. Os sistemas de ventilação natural são um exemplo de técnicas construtivas que contribuem para o conforto ambiental de uma edificação, dispensando o consumo de energia para o seu funcionamento. Em ambientes industriais, muitas vezes, estes sistemas de ventilação tornam-se a única alternativa economicamente viável.

Para um sistema de ventilação natural funcionar eficientemente, é necessário conhecer os diversos fatores que o influenciam. Dentre eles, o adequado dimensionamento das aberturas da edificação, a correta estimativa para os cálculos de vazão, para a renovação do ar, vinculada ao tipo de uso dos ambientes e, principalmente, os efeitos aerodinâmicos aos quais a edificação está submetida. A ação do vento é outro fator preponderante para que um sistema de ventilação natural cumpra com sua função em um edifício. Com isso, torna-se igualmente importante conhecer a influência que o entorno imediato pode exercer em relação ao escoamento do vento.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, analisar estes fatores, assim como determinar os efeitos de interferência aerodinâmica da vizinhança na eficiência dos sistemas de ventilação natural, aplicando estes conhecimentos em um estudo de caso de um pavilhão industrial. Para tal, procedeu-se uma análise teórica, com base na literatura existente e em normas vigentes, e uma análise experimental, através de modelos reduzidos, os quais foram ensaiados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

A análise experimental mostrou que a proximidade das construções vizinhas gera desempenhos diversos na vazão das aberturas do pavilhão em estudo, e variam conforme a orientação da fachada em relação ao ângulo de incidência do vento e a distância da vizinhança. Os efeitos da interferência são evidenciados em estruturas localizadas a uma distância menor que 10 vezes a dimensão da estrutura normal à ação do vento.

Palavras-chave: ventilação natural, efeito do vento, pavilhões industriais e interferência da vizinhança.

ABSTRACT

KLEIN, G. M. B. **Determination of the Neighborhood Effects in the Natural Ventilation Systems Efficiency in Industrial Pavilions.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The creation of alternative energy sources, which do not depend on the consumption of fossil fuels, is the challenge of the XXI century. The natural ventilation systems are an example of construction techniques that contribute to the environmental comfort of a building. These ventilation systems often become the only viable alternative in industrial environments.

The correct operation of a natural ventilation system depends of various factors. The appropriate sizing of the openings of the building and the correct estimate for the flow calculations are some of them. The action of the wind is another factor that interferes the working of the natural ventilation system in a building. Thus, it is also important to know the influence that the next surroundings can cause in the wind flow.

The goal of this work was analyze these factors and determine the inference effects caused by the next buildings in the natural ventilation systems. This study includes a case study of an industrial building, a theoretical analysis based on existing literature and current regulations and experimental analysis using a reduced model. The reduced model was tested in the Prof. Joaquim Blessmann wind tunnel, in the *Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Brasil.*

The experimental analysis showed that the distance from neighboring buildings to industrial building in study generates different results and its vary according to the orientation of the building facade to the angle of wind incidence.

Key-words: natural wind, effect wind, industrial buildings and neighborhood interference.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2	JUSTIFICATIVAS.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.3.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	15
1.3.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	16
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	18
2.1.1	<i>Ventilação.....</i>	18
2.1.2	<i>Ventilação Natural.....</i>	18
2.1.3	<i>Ventilação Industrial.....</i>	19
2.1.4	<i>Ventilação Geral Diluidora (VGD).....</i>	20
2.2	VENTILAÇÃO NATURAL PELA AÇÃO DO VENTO.....	25
2.3	EFEITOS PRODUZIDOS PELA INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA.....	27
3	MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE VENTILAÇÃO.....	36
3.1	VAZÃO DE AR EM ABERTURAS.....	36
3.2	ESTUDO DE CASO.....	43
4	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO UTILIZANDO MODELOS REDUZIDOS.....	49
4.1	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	49
4.2	SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL.....	51
4.3	ENSAIOS DE INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA.....	53
4.4	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA.....	56
4.5	ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO DO AR.....	73
5	CÁLCULO DAS VAZÕES DE VENTILAÇÃO E DO FATOR DE VIZINHANÇA.....	84
6	CONCLUSÕES.....	89
6.1	CONCLUSÕES DA PESQUISA.....	89
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
7	REFERÊNCIAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Ventilação Local Exaustora e (b) Ventilação Geral Diluidora.	20
Figura 2 - Ferrybridge, Inglaterra (1965) - colapso de três das oito torres de resfriamento, atribuído aos efeitos da interferência de vizinhança entre as torres.	28
Figura 3 - Efeito Venturi.	31
Figura 4 - Deflexão do vento na direção vertical.	31
Figura 5 - Características da esteira.	32
Figura 6 - Regime de escoamento de corpo isolado.	33
Figura 7 - Regime de escoamento deslizante.	33
Figura 8 - Regime de escoamento de interferência de esteira.	34
Figura 9 - Vista superior do galpão industrial (unidades em milímetros).	44
Figura 10 - Corte Transversal do galpão industrial (unidades em milímetros).	45
Figura 11 - Fachada dos oitões do galpão industrial (unidades em milímetros).	45
Figura 12 - Fachada das laterais do galpão industrial (unidades em milímetros).	46
Figura 13 - Aberturas de entrada ou saída de ar do pavilhão industrial em planta baixa.	48
Figura 14 - Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.	50
Figura 15 - Caracterização do túnel de vento de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis.	51
Figura 16 - Características do vento deslizante e turbulento simulado - expoente $p = 0,23$	53
Figura 17 - Aspecto da mesa do túnel de vento e disposição do modelo instrumentado (branco) e do modelo vizinho, a uma distância s	55
Figura 18 - Modelo fechado, com representação das tomadas de pressão.	56
Figura 19 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão na fachada a barlavento.	57
Figura 20 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão nas fachadas dos oitões.	57
Figura 21 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão na fachada a sotavento.	57
Figura 22 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão da cobertura e exaustor natural de cumeeira.	58
Figura 23 - Preparação para montagem dos modelos reduzidos.	59
Figura 24 - Mangueiras de PVC: numeração e colocação no modelo.	60
Figura 25 - Detalhe da montagem do modelo e na mesa de ensaio, com modelo vizinho.	61
Figura 26 - Detalhe do engate rápido, peça responsável pela conexão das mangueiras aos transdutores elétricos de pressão do túnel (SCANIVALVE).	61
Figura 27 - Sistema de aquisição de dados dos ensaios: computador (lado esquerdo), ManoAir e barômetro.	62
Figura 28 - Modelo inserido na Mesa II do túnel, com vizinho a uma distância $0,5b$	63
Figura 29 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa – Planta baixa.	66
Figura 30 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa – Seções longitudinal e transversal.	67
Figura 31 - Coeficientes de pressão – Fachada a barlavento.	71
Figura 32 - Coeficientes de pressão – Fachada a sotavento.	72
Figura 33 - Coeficientes de pressão – Exaustor natural de cumeeira.	73
Figura 34 - Modelo com as janelas e o exaustor abertos, para medição direta das velocidades de escoamento do vento.	74
Figura 35 - Detalhes do exaustor e modelo pronto com vizinho, distância $0,5b$	75
Figura 36 - Numeração e respectivas áreas das aberturas do protótipo.	75
Figura 37 - Posicionamento e fixação das sondas no modelo.	76
Figura 38 - Planta baixa do modelo – posicionamento das sondas.	77

Figura 39 - Fachada do modelo a barlavento - posicionamento das sondas.	77
Figura 40 - Fachada do modelo a sotavento - posicionamento das sondas.	77
Figura 41 - Detalhes do anemômetro de fio quente e suportes para sua fixação.	78
Figura 42 - Sistema de controle das sondas de fio quente.....	79
Figura 43 - Modelo instrumentado no interior do túnel.	80
Figura 44 - Time series para a Sonda 2, <i>modelo isolado</i>	80
Figura 45 - Velocidades adimensionais para as sondas 1, 2 e 3.....	82
Figura 46 - Vazões obtidas para a fachada a barlavento.	85
Figura 47 - Vazões obtidas para a fachada a sotavento.....	86
Figura 48 - Vazões obtidas para o exaustor natural de cumeeira.	86
Figura 49 - Vazões de entrada de ar x Usos x Pessoa atendidas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trocas de ar por hora [N]	23
Tabela 2 - Taxa de ar por pessoa.	24
Tabela 3 - Coeficientes de descarga (K).....	37
Tabela 4 - Descrição das aberturas de entrada e saída de ar do protótipo.	48
Tabela 5 – Distâncias para os ensaios de interferência de vizinhança.	54
Tabela 6 - Definição das configurações de ensaio de acordo com o tipo de ensaio e a posição da vizinhança (ângulo de incidência = 90°).	55
Tabela 7 - Dados complementares obtidos durante os ensaios.	63
Tabela 8 - Pressões dinâmicas de referência para a velocidade de 2 m/s.....	64
Tabela 9 – Coeficientes de pressão – Fachada a barlavento.....	64
Tabela 10 – Coeficientes de pressão – Fachada a sotavento.	65
Tabela 11 – Coeficientes de pressão – Exaustor natural de cumeeira.....	65
Tabela 12 – Coeficientes de pressão médios para cada abertura e coeficientes de forma.	68
Tabela 13 – Determinação dos coeficientes de pressão interna ($c_{p,i}$) a partir da NBR 6123/88.....	69
Tabela 14 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 0,5b.....	69
Tabela 15 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 1b.....	69
Tabela 16 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 2b.....	70
Tabela 17 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 4b.....	70
Tabela 18 – Coeficientes de pressão interna para a configuração modelo isolado.	70
Tabela 19 – Dados dos ensaios de medição direta de velocidades.....	81
Tabela 20 – Velocidades adimensionais medidas para cada uma das sondas.	81
Tabela 21 – Vazões a partir dos ensaios de pressões.	84
Tabela 22 – Vazões Q [m ³ /s] a partir dos ensaios de velocidades para V = 2 m/s	84
Tabela 23 – Cálculo do Fator de Vizinhança a partir das vazões obtidas nos ensaios.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o constante incremento da demanda de energia no Brasil e no mundo, a busca por formas de geração de energia limpa, ou seja, de tecnologias não poluentes e que não consumam fontes de energia não renováveis, tornou-se o desafio de toda a ciência moderna. Criar fontes alternativas de produção de energia, que não dependam principalmente do consumo de combustíveis fósseis, é o desafio do século XXI.

Tão importante quanto gerar, é otimizar a demanda por energia. Na construção civil, o desenvolvimento de sistemas construtivos capazes de diminuir o consumo de energia elétrica vem ao encontro desta tendência.

Sistemas de ventilação natural exemplificam a utilização de técnicas construtivas que contribuem para o conforto ambiental de uma edificação, dispensando o consumo de energia para o seu funcionamento. Em ambientes industriais, muitas vezes, estes sistemas de ventilação tornam-se a única alternativa economicamente viável.

Para um sistema de ventilação natural funcionar eficientemente, é necessário conhecer os diversos fatores que o influenciam. Dentre eles, o adequado dimensionamento das aberturas da edificação, a correta estimativa para os cálculos de vazão, para a renovação do ar, vinculada ao tipo de uso dos ambientes e, principalmente, os efeitos aerodinâmicos aos quais a edificação está submetida.

A ação do vento é fator preponderante para que um sistema de ventilação natural cumpra com sua função em um edifício. Com isso, torna-se igualmente importante conhecer a influência que o entorno imediato pode exercer em relação ao escoamento do vento.

O objetivo deste trabalho é, portanto, analisar estes fatores, assim como determinar os efeitos de interferência aerodinâmica da vizinhança na eficiência dos sistemas de ventilação natural, aplicando estes conhecimentos em um estudo de caso de um pavilhão industrial. Para tal, procedeu-se uma análise teórica, com base na literatura existente e em normas vigentes, e uma análise experimental, através de modelo reduzido, o qual foi ensaiado no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Os sistemas de ventilação natural, quando corretamente utilizados, produzem uma série de vantagens, tanto econômicas, quanto sociais e ambientais.

Como impacto econômico, pode ser citada a queda expressiva dos custos com energia elétrica por parte da climatização artificial. Em ambientes comerciais e industriais, promovem um aumento da produtividade, reduzindo o desconforto geral do ambiente interno de trabalho, evitando, com isso, a queda no rendimento dos trabalhadores. Auxiliam, ainda, no controle de agentes contaminantes do ar que possam estar presentes nestes tipos de ambiente.

Pode-se citar como fator de impacto social, a melhoria na saúde dos trabalhadores, pois a exposição ao calor ou frio excessivos pode favorecer a criação de uma série de doenças, além do aumento do número de acidentes de trabalho. Em indústrias, os acidentes de trabalho aumentam na mesma proporção que o conforto térmico diminui.

Igualmente importante, são os fatores que impactam o ambiente: um sistema de ventilação eficiente ajuda a combater possíveis focos de incêndio, pois a fumaça procura não ficar confinada na edificação, buscando naturalmente meios de saída do ambiente; a ventilação natural contribui, ainda, para a sustentabilidade do meio ambiente, pois não necessita de qualquer fonte energética para o seu correto funcionamento.

Diante destes argumentos, devem ser criadas condições que favoreçam uma permanente troca do ar interior, viciado, pela mesma quantidade de ar exterior, permitindo sua constante renovação. Em ambientes industriais, a ventilação natural permite a troca de grandes volumes de ar sem a necessidade de ventilação forçada e conseqüente consumo de energia elétrica.

A ventilação natural pode ser definida como a passagem de ar através de um ambiente, sem que haja, para tal, o uso de fontes mecânicas. A movimentação do ar pode ser gerada por efeito chaminé (convecção natural), pela ação do vento ou uma composição dos dois mecanismos. Depende também da diferença de pressão entre o ambiente interno e seu exterior, além da resistência oferecida por suas aberturas. Tem como objetivo principal o controle da pureza do ar, além de auxiliar no controle da umidade e da temperatura de uma edificação.

Neste estudo, foi analisada apenas a ventilação natural pela ação do vento, sendo desconsideradas as contribuições do efeito chaminé (convecção natural).

Através de ensaios de modelos reduzidos, é possível determinar as vazões de ventilação, por efeito da ação do vento, por meio de dois procedimentos: medição dos coeficientes de pressão e medição direta das velocidades nas aberturas do modelo.

O método de medição dos coeficientes de pressão permite comparar resultados teóricos, a partir de valores fornecidos por Norma, com valores obtidos através de ensaios. Já os ensaios em túnel de vento, possibilitam a obtenção de resultados mais precisos, pois permitem simular as propriedades do vento natural. A determinação da vazão de ventilação por medição direta das velocidades de entrada e saída de ar nas aberturas é feita por meio de anemômetros de fio quente. Ambas metodologias de determinação das vazões de ventilação foram utilizadas, visando a comparação entre seus resultados.

A Norma NBR 6123 (1988) afirma que não é possível indicar valores numéricos para efeitos de vizinhança de um modo genérico e normativo. Estes efeitos podem ser determinados por ensaios em túnel de vento, em que se reproduzem as condições de vizinhança e as características do vento natural que possam influir nos resultados. Edificações de vizinhança podem aumentar ou diminuir os esforços gerados pelo escoamento do vento em uma edificação, e dependem, principalmente, da sua geometria e disposição, sua orientação em relação à direção do escoamento, além das condições do terreno em seu entorno.

Foram simuladas em túnel de vento, portanto, algumas configurações de inserção de vizinhança, visando determinar sua interferência no escoamento do vento e, com isso, comparar resultados obtidos com os dos ensaios com o modelo isolado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi determinar os efeitos aerodinâmicos produzidos pela interferência da vizinhança nos sistemas de ventilação natural de pavilhões industriais, utilizando modelos reduzidos para ensaio em túnel de vento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo resumiram-se em:

1. Obter uma estimativa de cálculo dos coeficientes de pressão e das vazões (para o modelo isolado e incidência do vento de 90°), para o pavilhão industrial, a partir de um dos diversos modelos teóricos disponíveis na literatura e na norma NBR 6123;
2. Obter os coeficientes de pressão e vazões medidas com o modelo reduzido do pavilhão industrial por meio de um estudo experimental. O experimento será realizado através de ensaios em túnel de vento, considerando o método de medição dos coeficientes de pressão, com o modelo isolado e para diversas configurações de vizinhança;
3. Obter as velocidades médias e vazões medidas nas aberturas do modelo reduzido do pavilhão industrial por meio de um estudo experimental. O experimento será realizado através de ensaios em túnel de vento para o método de medição direta da velocidade de escoamento do vento nas aberturas, considerando o modelo isolado e em diversas configurações de vizinhança e também algumas configurações de abertura do pavilhão.
4. Obter a comparação dos resultados teóricos com os experimentais na determinação da vazão de ventilação por efeito do vento (para o modelo isolado e incidência do vento de 90°).
5. Obter a influência da vizinhança, comparando os valores para as vazões de escoamento do vento, medidos experimentalmente, através de ensaios do modelo isolado e com vizinho.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, os quais são descritos a seguir. No Capítulo 1, “Introdução”, são apontadas as justificativas e os objetivos, gerais e específicos, que ressaltam a importância da execução do estudo. Já o Capítulo 2, “Revisão Bibliográfica”, traz um histórico de publicações e os conceitos fundamentais sobre os temas da ventilação natural e da influência da vizinhança no escoamento do vento. No Capítulo 3 “Métodos Para a Determinação da Vazão de Ventilação”, são apresentados os modelos teóricos, com base na literatura sobre o tema, para o dimensionamento de sistemas de ventilação natural, assim como a aplicação destes modelos em um estudo de caso.

O Capítulo 4, “Ensaio em Túnel de Vento Utilizando Modelos Reduzidos” define os procedimentos para a realização dos ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos, além de apresentar os dados experimentais obtidos.

O Capítulo 5, “Cálculo das Vazões e do Fator de Vizinhança”, apresenta a determinação das vazões de ventilação e do fator de vizinhança, a partir dos dados obtidos através da norma e dos ensaios, além da comparação dos resultados.

As conclusões finais da pesquisa podem ser encontradas no Capítulo 6, “Conclusões”, assim como as recomendações para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas em "Referências" as referências bibliográficas em que este estudo se embasou.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A seguir, são apresentados os principais conceitos que regem este estudo.

2.1.1 Ventilação

Ventilar é efetuar a troca do ar de um ambiente pela mesma quantidade de ar exterior, buscando sua constante renovação. Pode ocorrer por meios naturais, sendo chamada de ventilação natural, ou por equipamentos mecânicos, conhecida por ventilação mecânica.

Seu objetivo principal é controlar a pureza do ar, visando o bem estar físico e a segurança dos usuários de um determinado ambiente, como definem Clezar e Nogueira (1999).

2.1.2 Ventilação Natural

Segundo Macintyre (1990), a ventilação natural “consiste em proporcionar a entrada e a saída do ar de um ambiente sob uma forma controlada e intencional graças a aberturas existentes para esse fim, como é o caso de janelas, portas e lanternins”, e depende da diferença entre as pressões externa e interna atuantes em uma edificação ou ambiente, além da resistência oferecida ao escoamento do ar pelas aberturas. É um movimento normal do ar por forças naturais, sem que haja fontes mecânicas ou fornecimento de energia ao seu escoamento.

A ventilação natural pode ser promovida por dois mecanismos: a ação dos ventos e o denominado efeito chaminé. Ambos os mecanismos podem, também, ocorrer simultaneamente. Quando não há vento, é o efeito chaminé o único responsável pela renovação do ar das edificações que não possuem sistemas mecânicos de ventilação.

Esse efeito é caracterizado pela diferença entre as temperaturas do exterior e do interior do prédio, havendo, conseqüentemente, diferença de densidade do ar externo e do ar interno do edifício. Quando a temperatura interna é maior que a externa, o ar externo, mais frio, ingressa na edificação através das aberturas mais baixas e o ar interno mais quente sai pelas aberturas mais elevadas. Um escoamento inverso ocorre quando a temperatura interna do ar é mais baixa que a temperatura externa. A denominada zona neutra é uma superfície onde as pressões internas se igualam às externas e, por conseguinte, aonde a presença de uma abertura não produz nem entrada ou saída de ar.

Conforme Toledo (1999), a ação do vento em um edifício, origina, em sua superfície externa, zonas de sobrepressão e sucção, ou seja, pressões maiores ou menores do que a pressão do ar antes de encontrar a edificação. A distribuição destas zonas e seus valores dependem não somente da direção e intensidade do vento, mas também da forma e dimensões da edificação. Já as pressões internas geradas pela mesma ação do vento nos diversos ambientes do edifício, dependem não só dos valores das pressões externas, como também das aberturas externas e internas por onde circula o ar.

A vazão de entrada ou saída de ar é determinada pela área e pela forma das aberturas, além da diferença de pressão existente entre a face externa e interna das referidas aberturas. Quando o vento age, sua ação na ventilação deve ser conjugada ao efeito chaminé.

2.1.3 Ventilação Industrial

A ventilação industrial trata das aplicações da ventilação em ambientes industriais. O uso da ventilação industrial pode ser dividido em três áreas principais, de acordo com Clezar e Nogueira (1999):

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

A ventilação industrial não visa apenas atender a condições favoráveis para aqueles que trabalham no interior das fábricas ou nos limites das mesmas, mas também objetiva impedir que o lançamento de contaminantes na atmosfera, através de chaminés ou outros recursos, venha poluir o ar, ameaçando a saúde e a vida da população das vizinhanças e até mesmo de locais relativamente afastados.

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

- Ventilação Local Exaustora (VLE), a qual é realizada por meio de um equipamento captador de ar junto à fonte poluidora. É um tipo de ventilação indicada para situações em que as fontes de poluição sejam perfeitamente identificadas e localizadas no interior do ambiente.

- Ventilação Geral Diluidora (VGD), a qual proporciona a ventilação de um ambiente, de um modo global. É indicada para situações em que a fonte de poluição do ar não está confinada em pontos perfeitamente identificáveis e permite, dentro de certos limites, o controle da temperatura, da umidade e da velocidade do ar.

A Figura 1 apresenta os dois grupos de ventilação industrial.

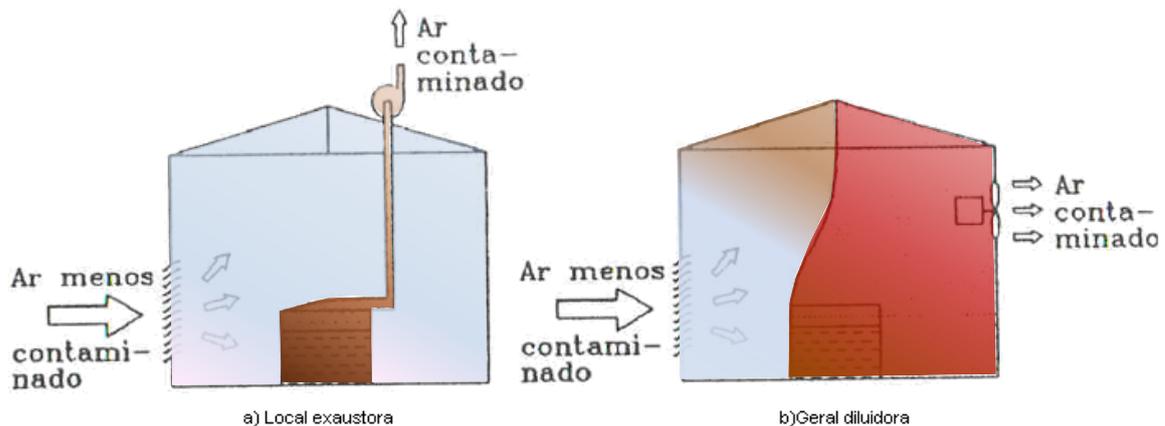


Figura 1 - (a) Ventilação Local Exaustora e (b) Ventilação Geral Diluidora.

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

2.1.4 Ventilação Geral Diluidora (VGD)

Clezar e Nogueira (1999) salientam que a VGD atua de maneira a minimizar a concentração do contaminante do ar por meio de sua diluição. Neste processo, o ar do espaço de trabalho é substituído por ar exterior, de uma maneira global e contínua.

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

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

A Ventilação Geral Diluidora permite, de forma limitada, o controle da temperatura, da umidade e da velocidade do ar. Para se obter um controle rigoroso da temperatura e a umidade ambiente, é necessário o uso de climatizadores artificiais de condicionamento de ar.

A VGD pode ser utilizada para:

- Remoção de calor sensível: ventilar salas de transformadores, salas de caldeiras e outros ambientes, com grande desprendimento de calor;
- Remoção de umidade: retirar altos níveis de umidade, gerados no ambiente, por desprendimentos de vapor d'água resultantes de vazamentos ou de processos industriais;
- Aplicações gerais: indicado para locais com pé-direito normal e onde ocorre a aglomeração de pessoas, tais como cinemas, teatros, ginásios de esportes etc., bem como aqueles com geração de contaminantes que oferecem pouco risco para a saúde dos ocupantes.

O principal parâmetro de um projeto de ventilação industrial é a vazão de ar. Ela determina praticamente todas as dimensões de uma instalação de ventilação. Conforme Nunes (2006), o cálculo da vazão de ar externo necessária, Q_e , é feito segundo o objetivo da ventilação:

Para remoção do calor sensível:

$$Q_e = \frac{q_T}{\rho_e \cdot C_p \cdot \Delta t} \quad \text{Equação 1}$$

sendo:

Q_e = Vazão de ar [m³/h];

$q_T = q_i + q_e$ = carga térmica total [kcal/h];

q_i = taxa de geração interna de calor devido à pessoas, equipamentos, iluminação [kcal/h];

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

ρ_e = massa específica do ar externo [kg/m³];

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

Δt = aumento de temperatura do ar [°C].

Para remoção de umidade:

$$Q_e = \frac{G_v}{\rho_e \cdot \Delta W} \quad \text{Equação 2}$$

sendo:

Q_e = vazão de ar [m³/s];

G_v = geração de vapor [kg/s];

ρ_e = massa específica do ar externo [kg/m³];

ΔW = aumento de umidade absoluta do ar [kg_{vapor} / kg_{ar seco}].

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

a) Com base no *número de trocas de ar por hora* (Tabela1), que, por ser um método empírico pouco rigoroso, deve ser utilizado com reservas, a vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = N \cdot \forall \quad \text{Equação 3}$$

sendo:

Q_e = vazão de ar [m³/h];

N = índice de renovação de ar por hora, ou, taxa de renovação de ar por hora,

ou número de trocas de ar por hora;

\forall = volume do ambiente [m³].

Tabela 1 - Trocas de ar por hora [N]

SITUAÇÃO	TROCAS DE AR POR HORA – N
Auditórios e salas de reuniões	4-6
Bancos	2-4
Salões de banquete	6-10
Casas de caldeiras	20-30
Lanchonetes	10-12
Cantinas	4-6
Salas de máquinas	20-30
Oficinas	6-10
Fundições	20-30
Salas de fornos	30-60
Garagens	6-8
Cozinhas	10-20
Laboratórios	4-6
Lavatórios	10-15
Lavanderias	20-30
Escritórios	4-6
Salões de pintura	30-60
Sala de aula	2-3

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

b) Com base na *taxa de ar por pessoa* (Tabela 2), para remover odores e fumaça, a vazão do ar externo é obtida por:

$$Q_e = Q_p \cdot N_p \quad \text{Equação 4}$$

sendo:

Q_e = vazão de ar [m^3/h];

Q_p = taxa de ar por pessoa [$(\text{m}^3/\text{h})/\text{pessoa}$];

N_p = número de pessoas

Tabela 2 - Taxa de ar por pessoa.

LOCAL	Q_p 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
Escritórios privados	51	42	Considerável
Estúdios	35	25	Nenhum
Lojas	17	13	Ocasional
Salas de hotéis	51	42	Grande
Residências	35	17	Alguns
Restaurantes	25	20	Considerável
Salas de diretores	85	50	Muito grande
Teatros – cinemas	13	8	Nenhum
Teatros – cinemas	25	17	Alguns
Auditórios	13	8	Nenhum
Auditórios	25	17	Alguns
Salas de aulas	50	40	Nenhum
Salas de reuniões	85	50	Muito grande
Por pessoa (não fumando)	13	8	-
Por pessoa (fumando)	68	42	-

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

Pode-se observar que, de acordo com Clezar e Nogueira (1999), para as situações em que se deseja remover apenas os contaminantes emitidos pelos ocupantes do ambiente, até treze trocas de ar por hora são suficientes. O limite superior da faixa é recomendado para a remoção de calor e vapor d'água em zonas temperadas. Em climas quentes, sugere-se o dobro dos valores indicados na Tabela 2. Em ambientes com grande aglomeração de pessoas fumantes, deve-se utilizar o dobro dos valores sugeridos.

2.2 VENTILAÇÃO NATURAL PELA AÇÃO DO VENTO

Apesar do grande número de variáveis que intervêm no fenômeno, a ação do vento na renovação do ar interior dos edifícios é de fácil compreensão no que diz respeito aos seus conceitos. Nunes (2006) pondera que, quando se deseja obter elementos quantitativos, a partir de um projeto, da vazão e da velocidade do ar em um dado ambiente, torna-se necessário admitir um certo número de hipóteses simplificativas que, ao final, tornam os valores estimados apenas como um referencial, devendo sempre ser comparados com os valores medidos em edifícios construídos ou em modelos reduzidos que tenham características similares.

Conforme Toledo (1999), as leis fundamentais que regem o fenômeno da ventilação natural foram apresentadas, de forma sintética, por Dick (1950), baseado na série de conferências ministradas por Sir Napier Shaw, em 1903, e nos dados experimentais obtidos na Building Research Station, da Inglaterra. Por analogia com a corrente elétrica, Shaw adotou uma equação geral, aplicável a circuitos de ar.

De acordo com Frota (1989), a primeira equação destinada à previsão da vazão de ventilação natural foi formulada por Emswiler que, em 1926 publicou na ASHRAE Transaction (vol. 32) um artigo intitulado “Neutral Zone in Ventilation”, estudo que foi mais voltado à ventilação natural por diferença de temperatura, além de introduzir o conceito de “zona neutra”, atualmente mais referido como “plano de pressão neutra”.

Do ponto de vista do conhecimento histórico dos estudos sobre o fenômeno da ventilação natural por efeito do vento, é importante destacar que os primeiros estudos são relacionados aos ensaios em túnel de vento. Podem ser citados os trabalhos de: Bailay e Vincent (1943), do *National Physical Laboratory*, de Londres, que realizaram uma série de ensaios com diferentes modelos de edifícios em túnel de vento, visando à determinação da distribuição dos coeficientes de pressão. Irminger e Nokkentved (1936), do *Royal Technical College*, de Copenhague, Givoni (1976), Van Straaten (1967) e Baturin (1976), determinaram coeficientes de pressão do vento e suas alterações em edifícios de forma simples, quando em presença de anteparos, a partir de modelos ensaiados em túnel de vento.

A partir da construção de túneis que simulam os ventos da camada limite atmosférica (CLA), que permitiram simular fisicamente as características do vento natural, os ensaios em túnel de vento passaram a apresentar resultados mais compatíveis com a situação real em que se encontram as edificações.

Hussain e Lee (1980) realizaram ensaios em túnel de vento sobre a influência de grupos de edificações em áreas urbanas nas distribuições dos coeficientes de pressão nas superfícies das edificações. Bruce (1974, 1975 e 1977) apresentou a utilização do método dos coeficientes de pressão para determinação da ventilação de ar em edificações. Subseqüentemente, propôs um programa de computador que calculava taxas de ventilação induzidas pelo vento. Seus resultados são baseados em ensaios de túnel de vento utilizando um celeiro (como um sólido) em escala reduzida. Brockett e Albright (1987) utilizaram os coeficientes de pressão obtidos por Bruce (1974) para produzir modelos de ventilação natural por efeito do vento e também por efeito da diferença de temperatura.

Juntamente com a utilização da metodologia que emprega os coeficientes de pressão para a determinação da vazão de ventilação, estudos foram realizados com o objetivo de estimar o coeficiente de eficiência do orifício (abertura) à passagem do ar, também chamado de coeficiente de descarga ou coeficiente de vazão. Aynsley et al. (1977) e Aynsley (1979) relataram que o coeficiente de descarga utilizado para a ventilação natural é comparado ao coeficiente dinâmico de perda de carga utilizado geralmente em tubulações. Recomendaram utilizar um coeficiente de descarga de 0,5 a 0,65 para a porosidade de barlavento de até 10% e 0,6 a 0,7 para a porosidade de 10% a 20%. Para o lado a sotavento, o coeficiente de descarga varia de 0,64 a 0,69 para uma porosidade da parede de 20% a 50%.

Segundo a ASHRAE (1981), o coeficiente de descarga depende do número de Reynolds (Re). Recomendam valores na ordem de 10^5 para Re (baseado em um orifício quadrado). O valor mais indicado para o coeficiente de descarga é 0,6. Este valor é recomendado para placas quadradas de bordas vivas do orifício, situadas em tubulações lisas.

O coeficiente de descarga possui grande disparidade, seu valor varia com a posição da passagem do ar e depende da geometria da abertura e condições de escoamento. Conforme Loredou-Souza (1995), o tipo de abertura de passagem de ar também influencia no escoamento através da edificação.

Chiu e Etheridge (2004) realizaram testes experimentais em túnel de vento para dois tipos de aberturas em uma edificação; uma janela nivelada à parede e uma abertura mais longa (chaminé), buscando valores mais apropriados para o coeficiente de descarga de aberturas de ventilação por efeito do vento, devido ao escoamento externo em torno da abertura, dos campos da velocidade e da pressão.

Para a abertura longa, concluíram que os efeitos do escoamento externo são menores. Os efeitos são significantes quando a tomada da abertura se encontra no escoamento externo.

Silvani (2005) utilizou diferentes equações teóricas para a determinação da vazão de ventilação por efeito do vento em um protótipo de pavilhão industrial, concluindo que as equações que utilizam iterações para a determinação da pressão interna são menos restritivas. Além disso, através de ensaios utilizando modelo reduzido em túnel de vento, observou que variações significativas ocorrem nas magnitudes dos coeficientes de pressão em função do tipo de vento simulado. Chiarello (2006) define procedimentos que podem ser adotados para ensaios em túnel de vento, de modelos reduzidos de pavilhões industriais, submetidos à ação de ventilação natural, causada apenas pelo efeito chaminé. Para isso, utilizou o mesmo estudo de caso de Silvani (2005).

Já Nunes (2006), realiza um estudo experimental da ventilação natural exclusivamente por efeito do vento, para o mesmo pavilhão industrial estudado por Silvani (2005) e Chiarello (2006), porém desconsiderando as contribuições do efeito chaminé, sendo analisadas e comparadas diferentes metodologias de determinação da vazão de ventilação.

2.3 EFEITOS PRODUZIDOS PELA INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA

Khanduri et al (1998) cita três principais razões que poderiam explicar a falta de um procedimento geral para a influência causada pelo efeito da vizinhança na ação do vento sobre uma edificação: primeiro, a natureza complexa do problema - mesmo para uma edificação adicional, já que há um grande número de variáveis envolvidas (tais como o tamanho e a forma das edificações, suas posições relativas, a direção do vento e as condições topográficas do entorno); segundo, a escassez de adequados dados experimentais; e terceiro, a noção de que os esforços gerados pelo vento seriam, em geral, menos severos com a presença da vizinhança do que em uma edificação isolada, principalmente por um grande número de edificações.

Contudo, estudos mostram a diversidade de efeitos quando há poucos prédios no entorno, que dependem, sobretudo, de suas posições em relação à edificação estudada.

Os efeitos da interferência na ação do vento em edifícios não é um tema recente; a referência mais antiga de estudo relacionado aos efeitos da interferência datam da década de 30.

Através de extensivos experimentos em túnel de vento, Harris (1934) concluiu que os esforços de torção no Empire State Building, em Nova Iorque, seriam duplicados caso fossem construídos dois blocos de edifícios a duas ruas de distância. Quase uma década depois, Bailey and Vincent (1943) buscaram determinar uma relação geral entre a velocidade do vento e a distribuição das suas pressões sobre coberturas inclinadas, planas e escalonadas, tanto em edificações com condições de total exposição, quanto em proximidade a outros prédios.

Pelas próximas duas décadas, as pesquisas em engenharia do vento e as conseqüentes generalizações e codificações dos efeitos do vento em edificações foram completamente focadas em edificações isoladas. O ressurgimento dos estudos dos efeitos da interferência de prédios vizinhos ocorreu no início da década de 70, provavelmente devido ao colapso de três das oito torres de resfriamento de Ferrybridge, Inglaterra, em 1965, o qual foi atribuído aos efeitos da interferência de vizinhança entre as torres, como mostra a Figura 2.



Figura 2 - Ferrybridge, Inglaterra (1965) - colapso de três das oito torres de resfriamento, atribuído aos efeitos da interferência de vizinhança entre as torres.

Já na segunda metade da década de 70, estudos foram realizados através de uma série de ensaios exploratórios mais simplificados. Estes envolviam dois modelos de edificações de base quadrada ou retangular, um servindo de modelo instrumentado e o outro de modelo vizinho. Os modelos foram testados em terreno de campo aberto, dispostos um atrás do outro ou lado a lado.

Inicialmente, foram medidas apenas pressões médias, sendo o suficiente para salientar a seriedade dos efeitos da interferência, quando pesquisadores começaram a usar modelos aeroelásticos para ensaios dinâmicos de interferência.

Pela primeira vez, deduzia-se um dos mais importantes aspectos do problema da interferência, que é o aumento considerável do momento máximo torcional, atingindo valores maiores que três vezes o valor medido em um modelo de edificação isolado (Blessmann e Riera, 1979 e Ruschewey, 1979).

Além da condição de exposição em campo aberto, os modelos foram testados em exposições que simulavam o meio suburbano e urbano. Conforme Melbourne e Sharp (1976), a exposição em campo aberto apresentou os mais desfavoráveis efeitos de interferência. A década de 80 produziu uma série de publicações englobando uma larga gama de problemas relativos aos efeitos da interferência.

Tentativas foram feitas para sugerir formas de codificar estes efeitos, como a da Standards Association Of Australia (1989), que incorporou detalhados fatores de proteção devido à vizinhança e mapas de contorno de martelamento pela turbulência gerada por um prédio a barlavento como um procedimento geral para uso dos projetistas. Detalhados estudos foram realizados sobre as características da ação do vento e seu padrão de escoamento em edificações em condições de interferência, assim como ensaios com grandes grupos de edifícios baixos. Além dos modelos prismáticos usuais, foram testados modelos de várias formas e inclinações de cobertura. As medições tornaram-se mais detalhadas, apresentando pressões médias e flutuantes, momentos, além de resposta estrutural e carregamentos (Hussain e Lee, 1980).

Na primeira metade da década de 90, pesquisas sobre os efeitos da interferência desenvolveram maior consistência e número de aplicações, dando continuidade às áreas de efeitos de proteção por edificações a barlavento, interferência aerodinâmica devida a edifícios altos, efeitos da interferência em grupos de edifícios e estudos de visualização do escoamento para explicar o fenômeno da interferência. Novos rumos incluem o estudo da interferência sob o ponto de vista estatístico, respostas torcionais de edifícios altos excêntricos e a modelagem dos efeitos da interferência usando redes neurais artificiais.

Reconhecendo a importância da estimativa dos efeitos da interferência de prédios vizinhos, a Standards Association of Australia (1989) incorporou um breve procedimento sobre o tema, sob a forma de nota de advertência: “... *O escoamento no entorno de qualquer estrutura, inserida em um conjunto, irá diferir do escoamento sobre uma estrutura isolada, gerando diferentes forças... Os efeitos da interferência são evidenciados em estruturas localizadas a uma distância menor que $10b$, onde b é a dimensão da estrutura normal à ação do vento.*”

Loredou-Souza et al (2003) afirmam que edificações situadas nas proximidades podem causar efeitos ponderáveis de interação, aumentando as sucções, forças e momentos torsões.

Existem diversos parâmetros que afetam o modo em que uma edificação altera o escoamento do vento em relação a outra edificação, localizado em sua proximidade, entre eles: o tamanho e a forma da edificação, a velocidade e a direção do vento, o tipo de terreno e, sobretudo, a localização e a proximidade dos prédios da vizinhança (Khanduri et al, 1998). Para entender o efeito de edificações vizinhas nos esforços devidos ao vento, é válido examinar o mecanismo de escoamento do vento em torno de uma edificação isolada e, depois, verificar como o mesmo é modificado com a inserção de edificações em seu entorno.

Não é possível, para efeitos normativos, obter-se uma indicação precisa que abranja todos os casos prováveis, visto seu grande número. Mas, de modo geral, a presença de edificações vizinhas pode causar aumento das forças do vento de três modos diferentes (ABNT NBR-6123, 1988):

(a) **Por efeito Venturi**

Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um afunilamento do vento acelerando o escoamento de ar, com uma conseqüente alteração nas pressões, como é ilustrado na Figura 3. Este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, caso em que já foram observados coeficientes de pressão médios negativos (sucções) excedendo, em módulo, o valor 2,0. Estas pontas de sucção verificaram-se nas paredes confrontantes das duas edificações, próximo às arestas de barlavento.

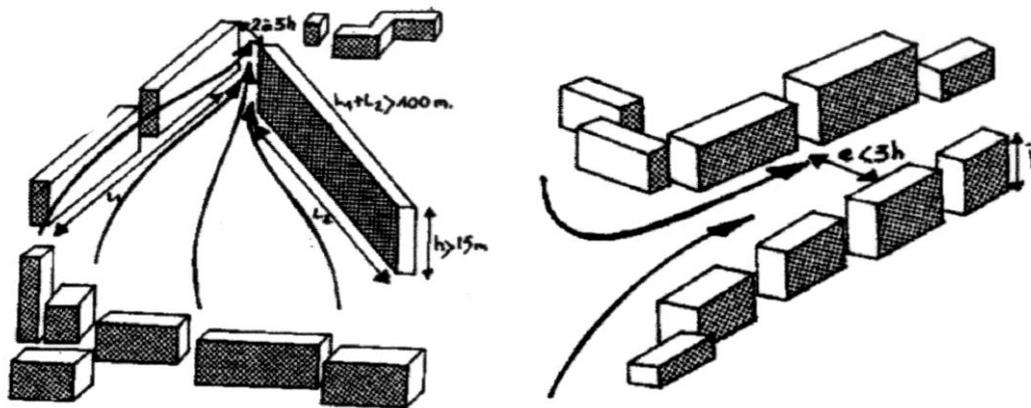


Figura 3 - Efeito Venturi.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

(b) Por deflexão do vento na direção vertical

Edificações altas defletem, para baixo, parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo, como mostra a Figura 4. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma médios atingindo valores entre -1,5 e -2,0.

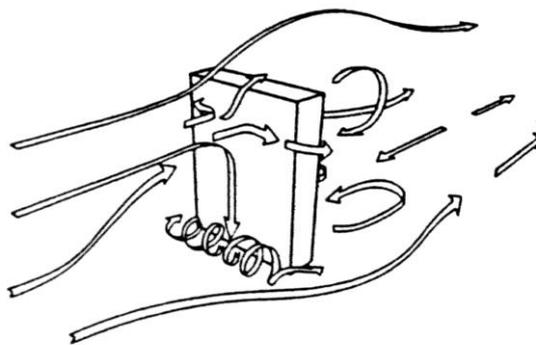


Figura 4 - Deflexão do vento na direção vertical.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

(c) Pela turbulência da esteira

Uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento (Figura 5), podendo causar efeitos dinâmicos ("efeitos de golpe") consideráveis e alterações nas pressões. Estas são particularmente importantes em edificações com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves.

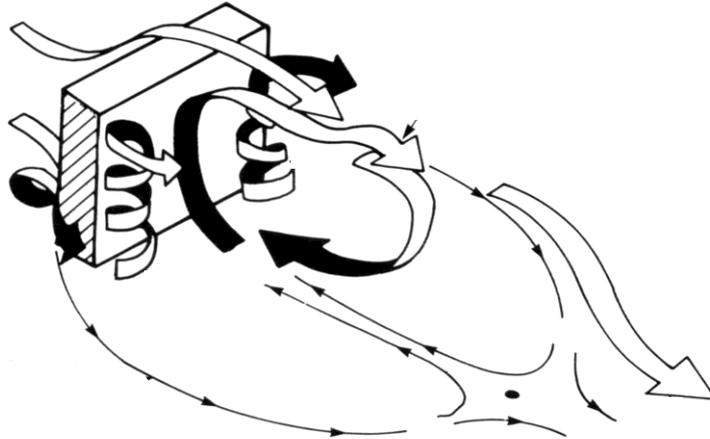


Figura 5 - Características da esteira.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

Para edificações alinhadas na direção do vento pode-se definir três regimes distintos de escoamento, caracterizados pelos padrões de escoamento mostrados a seguir (Cook, 1990):

- (a) regime de escoamento de corpo isolado;
- (b) regime de escoamento deslizante; e
- (c) regime de escoamento de interferência de esteira.

No **regime de escoamento de corpo isolado**, conforme Figura 6, os edifícios estão suficientemente afastados de tal forma que cada um atua isoladamente. Um vórtice de pé de fachada forma-se em torno de cada edifício individualmente e o escoamento posterior à esteira recola ao solo, antes de atingir o próximo edifício. Neste caso, a distância de separação, x , é maior do que a soma dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sotavento. O efeito de proteção neste caso é menor e as forças em cada edifício individualmente são similares aos valores correspondentes ao edifício isolado.

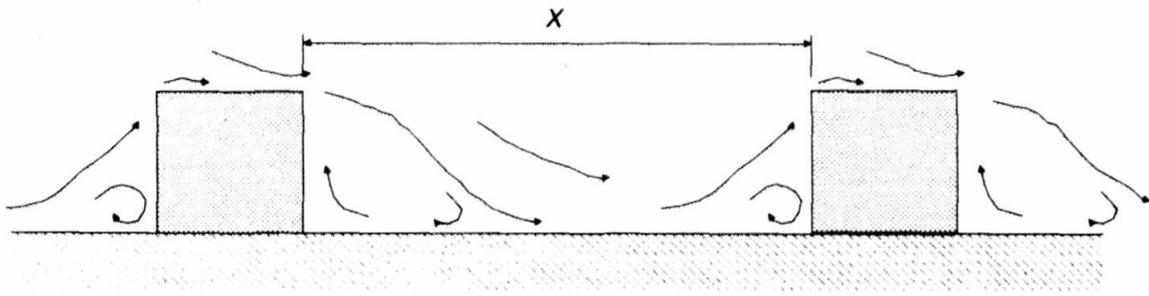


Figura 6 - Regime de escoamento de corpo isolado.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

No **regime de escoamento deslizante**, mostrado na Figura 7, os edifícios são suficientemente próximos de tal forma que um vórtice estável pode se formar no espaço entre eles. O escoamento parece saltar ou deslizar por sobre o topo dos edifícios. O efeito de proteção é grande e as forças nos edifícios situados a sotavento, individualmente, são muito pequenas, pois este edifício encontra-se mergulhado na esteira do primeiro.

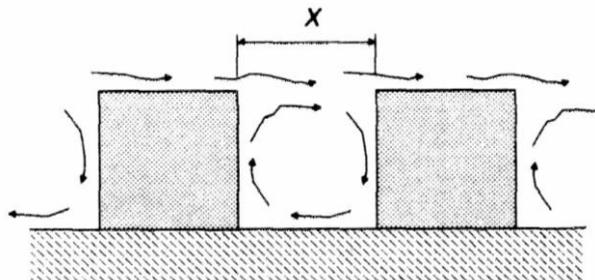


Figura 7 - Regime de escoamento deslizante.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

O **regime de escoamento de interferência de esteira** representa um estado intermediário entre os regimes de escoamento de corpo isolado e deslizante. Neste caso não há espaço suficiente para a formação completa da esteira, porém a separação é muito grande para que possa existir um vórtice estável. A Figura 8 apresenta este comportamento.

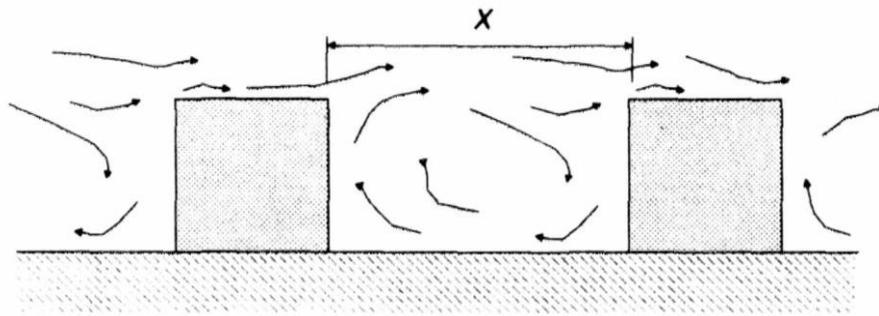


Figura 8 - Regime de escoamento de interferência de esteira.

Fonte: Loredou-Souza et al (2003).

A Norma NBR 6123 (1988) afirma que não é possível indicar valores numéricos para efeitos de vizinhança de um modo genérico e normativo. Estes efeitos podem ser determinados por ensaios em túnel de vento, em que se reproduzem as condições de vizinhança e as características do vento natural que possam influir nos resultados.

O problema é agravado pela possibilidade de alterações desfavoráveis das condições de vizinhança durante a vida útil da edificação em estudo.

Uma indicação aproximada dos aumentos que podem sofrer os coeficientes aerodinâmicos por efeitos de vizinhança é dada a seguir, conforme a NBR 6123:

s = afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo $a \times b$ as dimensões em planta das edificações

($a \times b$ entre 1×1 e 4×1)

d^* = a menor das duas dimensões:

- lado menor b ;

- semidiagonal $\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$

FV = fator de efeito de vizinhança, definido pela relação:

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}}$$

Equação 5

C = coeficiente aerodinâmico em estudo (C_e , $c_{pe,médio}$, C_a)

Os valores representativos de FV são os seguintes:

- para coeficiente de arrasto, C_a , para coeficiente de forma, C_e , e para valor médio do coeficiente de pressão, $c_{pe,médio}$, em paredes confrontantes (faces paralelas ao vento na Tabela 4 da NBR 6123):

$$s/d^* \leq 1,0 \dots\dots\dots FV = 1,3$$

$$s/d^* \geq 3,0 \dots\dots\dots FV = 1,0$$

- para coeficiente de forma, C_e , e para valor médio do coeficiente de pressão, $C_{pe,médio}$, na cobertura (conforme Tabela 5 da NBR 6123):

$$s/d^* \leq 0,5 \dots\dots\dots FV = 1,3$$

$$s/d^* \geq 3,0 \dots\dots\dots FV = 1,0$$

Interpolar linearmente para valores intermediários de s/d^* . Os fatores de efeito de vizinhança são considerados até a altura do topo dos edifícios vizinhos.

Os ensaios em que se baseiam as recomendações anteriores foram feitos com dois ou alguns poucos modelos de alturas aproximadamente iguais. Para o caso de muitos edifícios vizinhos nestas condições, os fatores de vizinhança geralmente serão menores, podendo ficar abaixo de 1,0. Entretanto, pode haver incidências do vento que causem valores de FV próximos aos indicados anteriormente, principalmente quando há “vazios” nas vizinhanças do edifício em estudo.

3 MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE VENTILAÇÃO

Em galpões industriais destinados a atividades que envolvam grande geração de calor ou outros elementos que alteram a qualidade do ar, o sistema de ventilação natural torna-se um elemento de fundamental importância na manutenção das condições de conforto de seus ambientes. Sendo a temperatura um dos principais problemas neste tipo de edificação, o projeto de um sistema de ventilação natural deve contemplar (Silvani, 2005):

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

A literatura apresenta diversas equações para a determinação das vazões de ventilação. Silvani (2005) e Nunes (2006) avaliaram diversos métodos e concluíram que os mesmos apresentam uma grande dispersão de resultados. Indicam, para o cálculo da vazão, modelos que se baseiam na diferença entre pressões externas e internas, como o proposto pela NBR-6123 (1988) e o de Clezar e Nogueira (1999).

Neste sentido, foram utilizados alguns destes modelos para a determinação da vazão de ventilação por efeito do vento, utilizando tanto valores indicados pela Norma, quanto valores obtidos através dos ensaios, e descritos a seguir.

3.1 VAZÃO DE AR EM ABERTURAS

Toledo (1999) afirma que a vazão de ar através das aberturas de uma edificação pode ser considerada como um caso particular da vazão através de orifícios existentes em placas finas inseridas em uma tubulação, quando o quociente do diâmetro do orifício pelo diâmetro do tubo é zero. Isto é o mesmo que considerar que o diâmetro do tubo onde foi colocada a placa com orifício é infinito.

Com base nesta premissa, a formulação que permite determinar o volume de ar que passa através do orifício (abertura) é a seguinte:

$$Q = K \cdot A_n \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{ar}}} \quad \text{Equação 6}$$

sendo:

Q = vazão de ar [m^3/s];

K = coeficiente de vazão ou coeficiente de descarga;

A_n = área do orifício: área livre para passagem do ar no caso de aberturas [m^2];

Δp = diferencial de pressão através do orifício, sendo a meia altura das aberturas [Pa];

ρ_{ar} = massa específica do ar que passa pelo orifício [kg/m^3].

O coeficiente de vazão (K) é uma medida da eficiência da abertura (orifício) à passagem do ar. Em aberturas com bordas não arredondadas, o coeficiente de descarga é quase independente do número de Reynolds e, para a maioria das edificações, não permanece constante. As variações de geometria das aberturas e a variação das pressões (variação do número de Reynolds), provocadas pelas condições ambientais internas e externas à edificação, fazem o coeficiente de vazão variar. Quanto maior a variação de pressão numa abertura, maior é a velocidade e maior é o número de Reynolds. A Tabela 3 fornece alguns valores do coeficiente de vazão para aberturas típicas.

Tabela 3 - Coeficientes de descarga (K).

Tipos de Aberturas	K
Aberturas com bordos arredondados	0,85
Aberturas com bordos vivos	0,62
Janelas basculantes com chapas a 60°	0,58
Janela veneziana com 50% de área livre	0,40

Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira, 1999, p. 105.

O diferencial de pressão (Δp), gerado pela ação do vento, entre os lados externo e interno de uma abertura, pode ser obtido diretamente por ensaios em túnel de vento, ou determinado por:

$$\Delta p = p_e - p_i = c_p \cdot q = (c_{p,e} - c_{p,i}) \cdot q \quad \text{Equação 7}$$

sendo:

p_e = pressão efetiva no lado externo da abertura [Pa];

p_i = pressão efetiva no lado interno da abertura [Pa];

q = pressão dinâmica de referência [Pa];

c_p = coeficiente de pressão

$c_{p,e}$ e $c_{p,i}$ = coeficientes de pressão médios (sobre a área da abertura), externo e interno, respectivamente.

A pressão dinâmica de referência (q) é a pressão provocada pelo escoamento não perturbado do vento. Para se determinar a pressão dinâmica de referência (q) de forma experimental, deve-se efetuar sua medição de forma isolada, em ensaio que precede os ensaios do modelo, a fim de se evitar perturbações no escoamento do vento devido à presença do mesmo. Este valor é obtido no eixo do túnel, em altura relacionada com o topo do modelo a ser ensaiado.

$$q = k_0 \cdot \Delta pa \quad \text{Equação 8}$$

sendo:

q = pressão dinâmica de referência [N/m^2];

k_0 = coeficiente que vincula q e Δpa , parâmetro obtido da correlação para a cota em escala correspondente a 12,58 metros do protótipo (topo do exaustor natural de cumeeira);

Δpa = pressão de referência (diferença de pressão entre os anéis piezométricos) [N/m^2].

Os coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) podem ser obtidos em Normas de vento ou por meio de ensaios, através da equação:

$$c_{p,e} = \frac{\Delta p}{q} \quad \text{Equação 9}$$

Para obter-se o $c_{pe,médio}$ de uma abertura, deve-se relacionar, através de uma média ponderada, o valor dos coeficientes de pressão, obtidos experimentalmente, com suas áreas de influência e com a área total da abertura.

A equação a seguir define este coeficiente:

$$c_{pe,m\u00e9dio} = \sum \frac{c_{p,n} \cdot AI_n}{A_j} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 10}$$

sendo:

$c_{p,n}$ = coeficiente de press\u00e3o para cada tomada de press\u00e3o [N/m²]

AI_n = \u00e1rea de influ\u00eancia de cada tomada de press\u00e3o [m²]

A_j = \u00e1rea total da abertura [m²]

J\u00e1 os coeficientes de press\u00e3o externa m\u00e9dios de todas as aberturas de uma mesma fachada, tamb\u00e9m conhecidos como coeficientes de forma (C_e), podem ser obtidos tamb\u00e9m pelo c\u00e1lculo de uma m\u00e9dia ponderada, expressa por:

$$C_e = \sum \frac{c_{pe,m\u00e9dio} \cdot A_j}{A_{face}} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 11}$$

sendo:

A_{face} = \u00e1rea total das aberturas de uma mesma fachada [m²]

O coeficiente de press\u00e3o interna ($c_{p,i}$), para uma mesma edifica\u00e7\u00e3o, depende da dire\u00e7\u00e3o do vento (m\u00e9dia temporal) e da distribui\u00e7\u00e3o e caracter\u00edsticas das aberturas (Blessmann, 1991; Loredou-Souza, 1995). O Anexo D da Norma NBR-6123, que trata da determina\u00e7\u00e3o do coeficiente de press\u00e3o interna, define que a vaz\u00e3o de ar por uma pequena abertura de \u00e1rea A \u00e9 dada por:

$$Q = K \cdot A \cdot V \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 12}$$

Onde:

K = coeficiente de vaz\u00e3o

ρ = massa específica do ar [kg/m³], considerada constante (isto é, o ar é considerado incompressível)

V = velocidade do ar na abertura [m/s], considerando-se:

$$V = \sqrt{\frac{2|\Delta p_e - \Delta p_i|}{\rho}} \quad \text{Equação 13}$$

A pressão interna efetiva pode ser obtida considerando-se que o volume de ar que entra é igual ao volume de ar que sai, em uma mesma unidade de tempo.

Isto significa:

$$Q = 0$$

Substituindo V na Equação 12 e considerando-se a Equação 13, tem-se:

$$\sum_1^n K \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta p_e - \Delta p_i|}{\rho}} = 0 \quad \text{Equação 14}$$

Com boa aproximação, K pode ser considerado constante, isto é, o mesmo para todas as aberturas.

Lembrando que:

$$\Delta p_e = c_{p,e} \cdot q \quad \text{e} \quad \Delta p_i = c_{p,i} \cdot q \quad \text{Equação 15}$$

a Equação 14 pode ser simplificada:

$$\sum_1^n \pm A \sqrt{|c_{p,e} - c_{p,i}|} = 0 \quad \text{Equação 16}$$

Admitindo-se um valor único para a pressão interna, $c_{p,i}$ pode ser determinado por aproximações sucessivas, arbitrando-se valores de $c_{p,i}$ na Equação 16.

Ainda segundo a Norma, a expressão anterior pode ser aplicada a aberturas maiores (janelas, portas, portões, ventilações, permeabilidade disseminada, etc.), desde que sejam considerados coeficientes de pressão médios nas periferias das aberturas. Estes coeficientes médios, que são

designados por C_e^* e C_i^* , tanto podem ser coeficientes de forma (C_e e C_i) como médias dos coeficientes de pressão.

Com esta generalização, a Equação 16, fica:

$$\sum_1^n \pm A \sqrt{|C_e^* - C_i^*|} = 0 \quad \text{Equação 17}$$

A raiz é considerada positiva para todos os termos que correspondam a aberturas com entrada de ar ($C_e^* > C_i^*$) e negativa para aberturas com saída de ar ($C_e^* < C_i^*$). Isto é, a raiz terá o mesmo sinal de $C_e^* - C_i^*$. O cálculo pode ser feito com aproximações sucessivas, arbitrando-se valores de C_i^* .

Para a determinação da massa específica do ar (ρ_{ar}), no momento do ensaio, utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_{ar} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_e} \cdot \frac{p_e}{p_0} \quad \text{Equação 18}$$

sendo:

ρ_0 = massa específica do ar em condições normais de pressão (p_0) e temperatura (T_0) = 1,22 kg/m³;

T_0 = 15°C = 288,2 K;

p_0 = 760 mm Hg = 1013,25 mm.c.a = 101325 Pa;

p_e = pressão atmosférica no momento do ensaio [mm Hg];

T_e = temperatura na câmara de ensaios no momento do ensaio [K];

T_e = 273,2 K + t ;

t = temperatura na câmara de ensaios [°C].

Substituindo-se Δp na Equação 6, pode-se calcular a vazão volúmica do ar, Q [m³/s], através de uma abertura de área A pelo efeito do vento:

$$Q = K \cdot A \sqrt{\frac{2}{\rho_{ar}} |c_{p,e} - c_{p,i}| \cdot q} \quad \text{Equação 19}$$

Considerando-se:

$$V = \sqrt{\frac{2|\Delta p_e - \Delta p_i|}{\rho}} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ar}} |c_{p,e} - c_{p,i}| \cdot q} \quad \text{Equação 20}$$

temos:

$$Q = K \cdot A \cdot V \quad \text{Equação 21}$$

Através da Equação 21, pode-se determinar as vazões de ar nas aberturas conhecendo-se o coeficiente de descarga da abertura, sua área e a velocidade média instantânea do ar que passa pela mesma.

Nesse trabalho, as velocidades médias nas aberturas do pavilhão industrial, utilizado como protótipo, foram determinadas através da multiplicação das velocidades médias adimensionais das aberturas do modelo em escala reduzida pela velocidade média do vento para o protótipo, considerada igual a 2 m/s.

$$V = V_{adm} \cdot 2 \quad \text{Equação 22}$$

Onde as velocidades adimensionais foram determinadas pela seguinte equação:

$$V_{adm} = \frac{V_{anem}}{V_{ref}} \quad \text{Equação 23}$$

sendo:

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

V_{ref} = velocidade média do vento no ponto de referência calculada a partir da pressão

dinâmica: $V_{ref} = \sqrt{2 \frac{q}{\rho_{ar}}}$ [m/s];

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

3.2 ESTUDO DE CASO

Para a aplicação dos métodos apresentados, foi utilizado o protótipo de um pavilhão industrial definido por Silvani (2005). Trata-se de um galpão, localizado na cidade de Passo Fundo – RS, Brasil, o qual era, até o momento de sua pesquisa, utilizado para abrigar uma fábrica para injeção de alumínio em carcaças e rotores elétricos. O pavilhão possui, como características principais, 50 metros de largura, 100 metros de comprimento e pé direito livre de 8 metros (desnível entre o piso e a face inferior da viga de cobertura). Sua cobertura é caracterizada por telhado de duas águas composto de telhas metálicas com isolamento térmico em lã de vidro e um exaustor natural de cumeeira, cuja abertura de garganta mede 1,5 metros de largura e 86 metros de extensão. Seu fechamento lateral é composto por paredes de alvenaria com 1 metro de altura (que servem de peitoril das janelas), uma faixa contínua de 1 metro de altura de janelas (basculantes nas fachadas dos oitões e venezianas nas fachadas laterais) e por telhas metálicas e telhas translúcidas no restante da altura. Possui, ainda, 8 portões distribuídos ao longo das quatro fachadas. As Figuras 9 a 12 apresentam vistas e um corte transversal do pavilhão a ser analisado, sendo suas dimensões representadas em milímetros [mm].

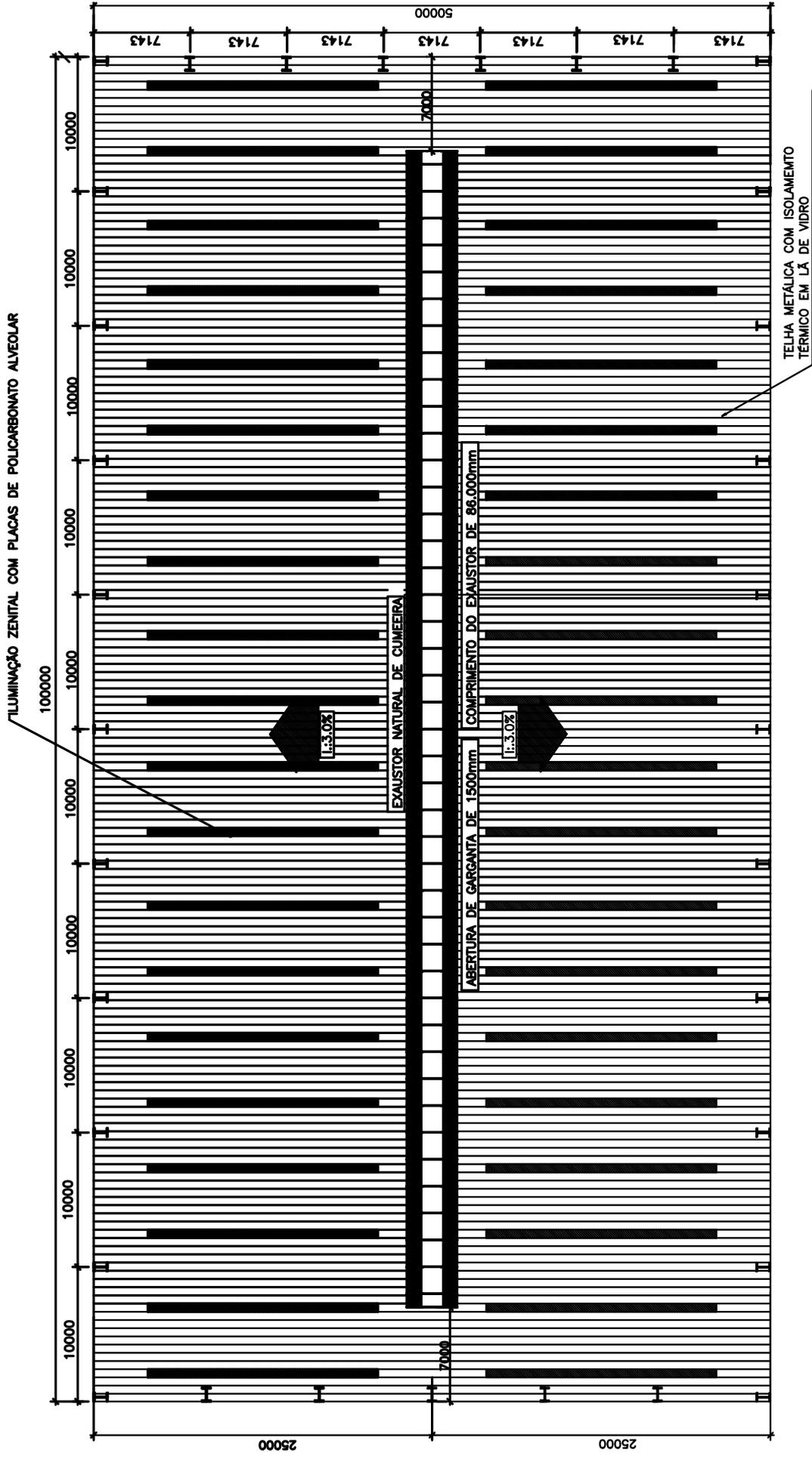


Figura 9 - Vista superior do galpão industrial (unidades em milímetros).

Fonte: SILVANI, 2005, p. 60.

Gustavo Menna Barreto Klein (gustavombklein@gmail.com) Dissertação. Porto Alegre. PPGEC/UFRGS, 2012.

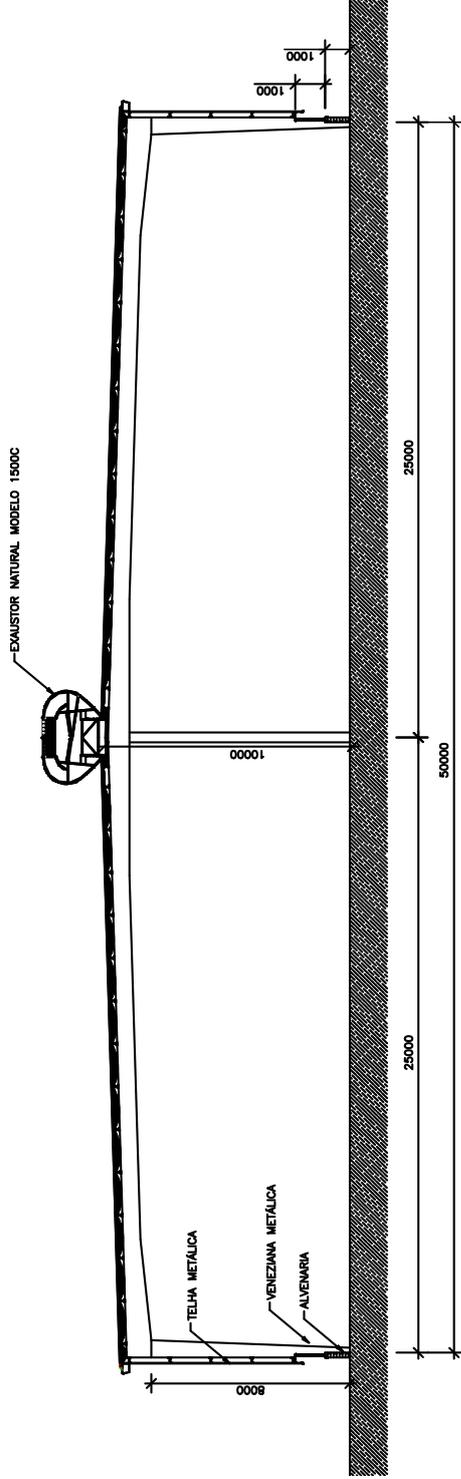


Figura 10 - Corte Transversal do galpão industrial (unidades em milímetros).

Fonte: SILVANI, 2005, p. 61.

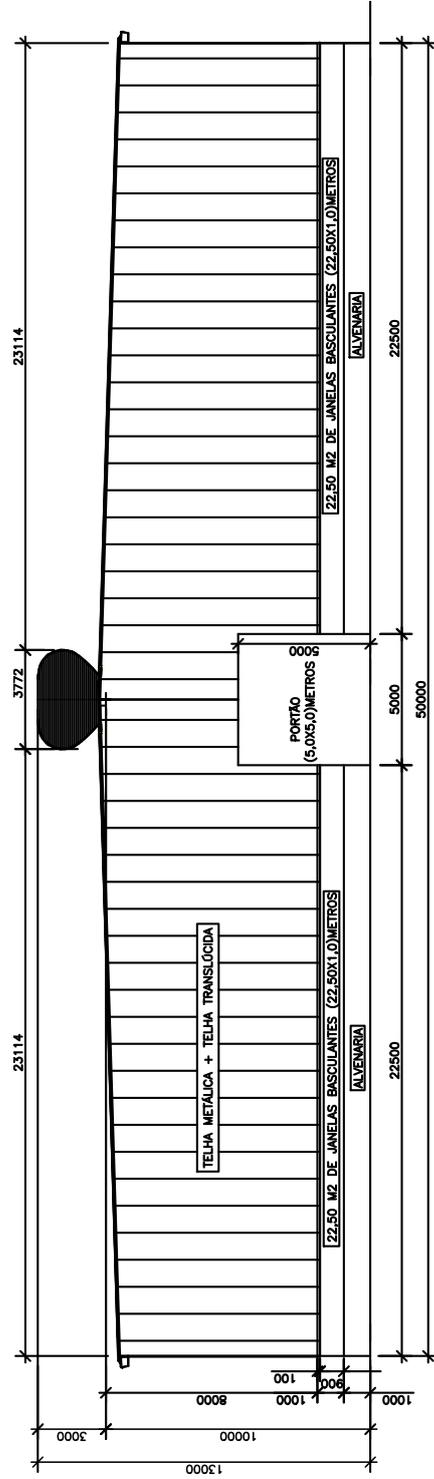


Figura 11 - Fachada dos oitões do galpão industrial (unidades em milímetros).

Fonte: SILVANI, 2005, p. 62.

Determinação dos efeitos da vizinhança na eficiência dos sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais.

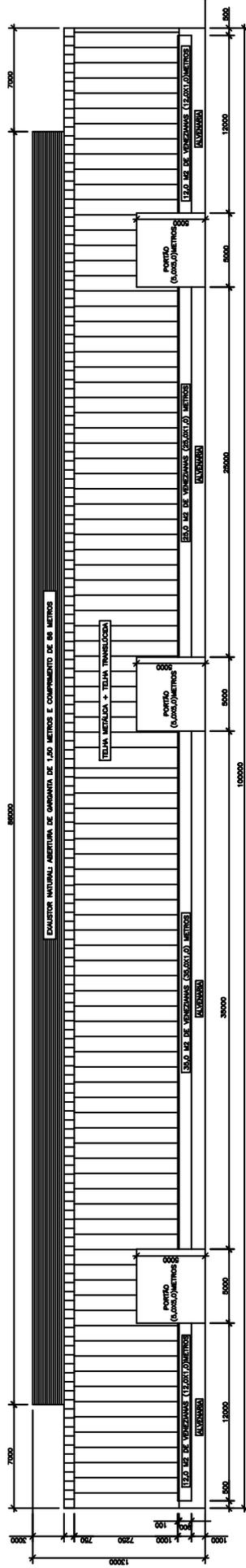


Figura 12 - Fachada das laterais do galpão industrial (unidades em milímetros).

Fonte: SILVANI, 2005, p. 63.

Os resultados obtidos, através da aplicação da metodologia de cálculo adotada para o dimensionamento das vazões de ventilação no protótipo, são apresentados no Capítulo 5, sendo adotados os seguintes critérios:

- Considerou-se a temperatura do ar que sai igual à temperatura do ar que entra no edifício, ou seja $\Delta t = 0$ (diferença entre a temperatura do ar que sai e do ar que entra no edifício igual a zero). Esta premissa foi utilizada na equação de Clezar e Nogueira;
- Como temperatura do ar externo, t_e , e interno, t_i , foi adotado o valor 21,5 °C. Esse valor foi obtido como a média das temperaturas dos quatro meses mais quentes do ano em Passo Fundo (dezembro, janeiro, fevereiro e março), considerando dia e noite, correspondentes ao período que 1961 a 1990 (EMBRAPA, 2004 apud Silvani, 2005);
- A massa específica do ar externo e interno resultou igual a 1,26 kg/m³.
- Para a determinação da vazão de ar, foi considerado o critério sugerido por Macintyre (1990) e Mesquita et al. (1988), segundo os quais os cálculos de vazão de ar devem ser feitos considerando uma velocidade do vento igual a 50% da velocidade média sazonal. Essa velocidade média igual a 4,0m/s foi obtida dos registros da Embrapa Trigo-Passo Fundo, correspondentes aos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, durante o período 1977 a 1994 (EMBRAPA, 2004 apud Silvani, 2005);
- Os coeficientes de pressão, considerados nos cálculos do Capítulo 5, foram os sugeridos pela NBR-6123 (1988) – Forças devidas ao vento em edificações, para vento à 90°, agindo perpendicularmente à fachada principal (comprimento de 100m), além dos obtidos experimentalmente através dos ensaios em túnel de vento;
- No cálculo da ventilação as janelas das fachadas perpendiculares ao vento (comprimento de 100m) e o exaustor de cumeeira foram considerados abertos, porém os portões e as janelas das fachadas dos oitões (comprimento de 50m) foram considerados fechados;
- As janelas do pavilhão, assim como a abertura correspondente ao exaustor natural de cumeeira, possuem áreas e numeração conforme indicado na Figura 13 e a Tabela 4.

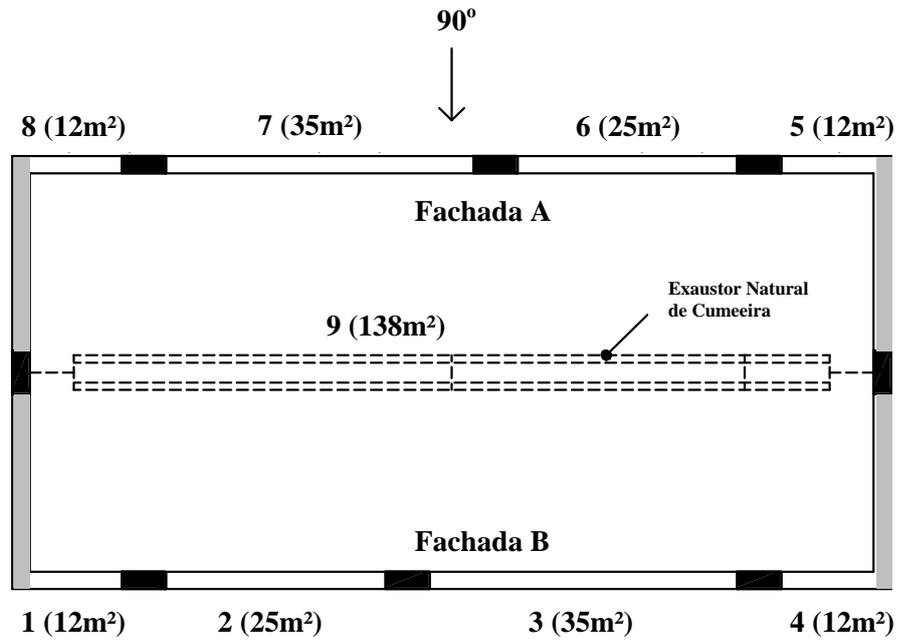


Figura 13 - Aberturas de entrada ou saída de ar do pavilhão industrial em planta baixa.

Tabela 4 - Descrição das aberturas de entrada e saída de ar do protótipo.

Posição das aberturas	Abertura (Figura 13)	Área da Abertura [m ²]	Área total [m ²]
Fachada A (barlavento)	5	12,00	84,00
	6	25,00	
	7	35,00	
	8	12,00	
Fachada B (sotavento)	1	12,00	84,00
	2	25,00	
	3	35,00	
	4	12,00	
Exaustor natural de cumeeira	9	138,00	138,00

4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO UTILIZANDO MODELOS REDUZIDOS

Ensaio de modelos reduzidos possibilitam a obtenção de resultados experimentais, que podem ser comparados aos métodos teóricos para a obtenção da vazão de ventilação por efeito dos ventos em pavilhões industriais. Este método é o mais indicado para se estimar corretamente o comportamento do vento em uma edificação, já que permite representar a sua geometria e a topografia onde está inserida. Com relação à influência da vizinhança, é a única forma de se precisar como edificações de entorno afetam o escoamento do vento e, no caso deste estudo, a ventilação natural por efeito do vento. Tais experimentos devem ser realizados em túneis de vento que permitam representar as características da camada limite atmosférica.

Para os ensaios, foram projetados 2 modelos reduzidos do pavilhão industrial descrito no capítulo anterior, que foram ensaiados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982 e Cook, 1990). O mesmo padrão de modelo foi utilizado por Silvani (2005) e Nunes (2006), no qual foram determinados os coeficientes de pressão estática nas superfícies do modelo e as velocidades de escoamento do vento através de suas aberturas, com a finalidade de se obter as vazões de ventilação, sempre para um modelo isolado.

Para este estudo, foram confeccionados, também, 2 modelos com as mesmas características dos anteriores, que serviram de edificação vizinha, para se analisar a sua interferência nos modelos instrumentados.

4.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982), mostrado na Figura 14. Trata-se de um túnel de vento de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais.

Tem relação *comprimento / altura* da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões 1,30m × 0,90m × 9,32m (largura × altura × comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e de baixa turbulência, sem modelos, é de 42 m/s (150 km/h).



Figura 14 - Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

Atualmente, o túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos. A localização dessas mesas e outras características físicas do túnel de vento podem ser vistas na Figura 15. Maiores detalhes e outras informações sobre o túnel de vento podem ser encontrados em Blessmann (1982, 1990).

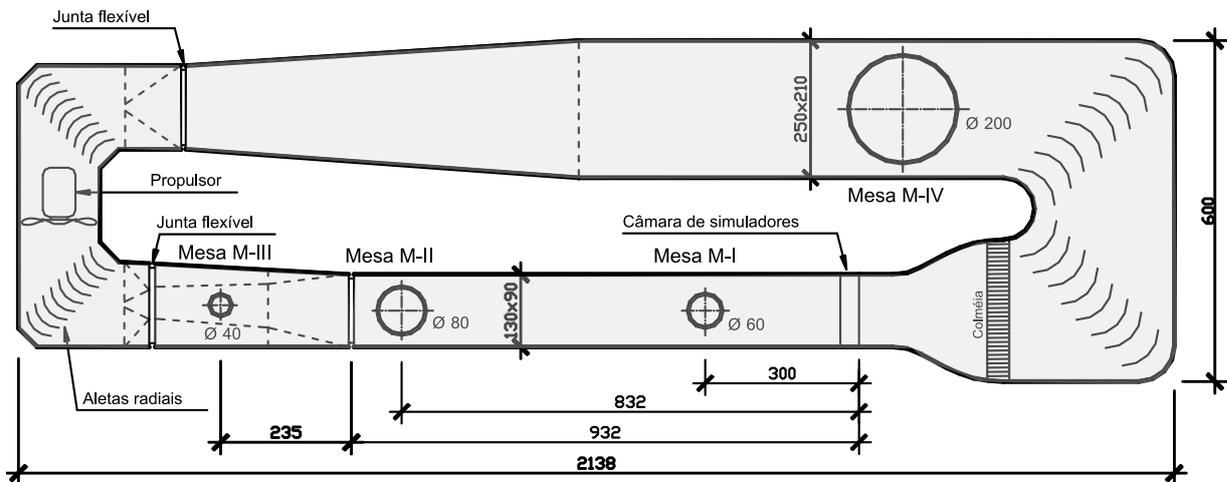


Figura 15 - Caracterização do túnel de vento de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis.

4.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

A reprodução das características do vento natural, no interior do túnel, é obtida através da combinação adequada de obstáculos colocados em uma gaveta no início da câmara de ensaios e blocos disseminados no piso da seção principal de ensaios. Outra possibilidade de reprodução da estrutura do vento natural é através de jatos de ar, lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir de seu piso. Maiores informações sobre a reprodução das características do vento natural no túnel em questão podem ser obtidas em Blessmann (1982, 1990). Uma simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (Davenport e Isyumov, 1967), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

Os modelos foram ensaiados na mesa M-II do túnel (ver Figura 15) e submetidos a ventos deslizantes e turbulentos com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$, correspondendo a terreno com rugosidade entre as **Categorias III e IV** da NBR-6123, tendo 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 urbanizada.

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.

As principais características deste vento simulado nos ensaios podem ser vistas na Figura 16, estando representados, graficamente, o perfil vertical das velocidades médias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), a intensidade (I1) e a macroescala (L1) da componente longitudinal da turbulência.

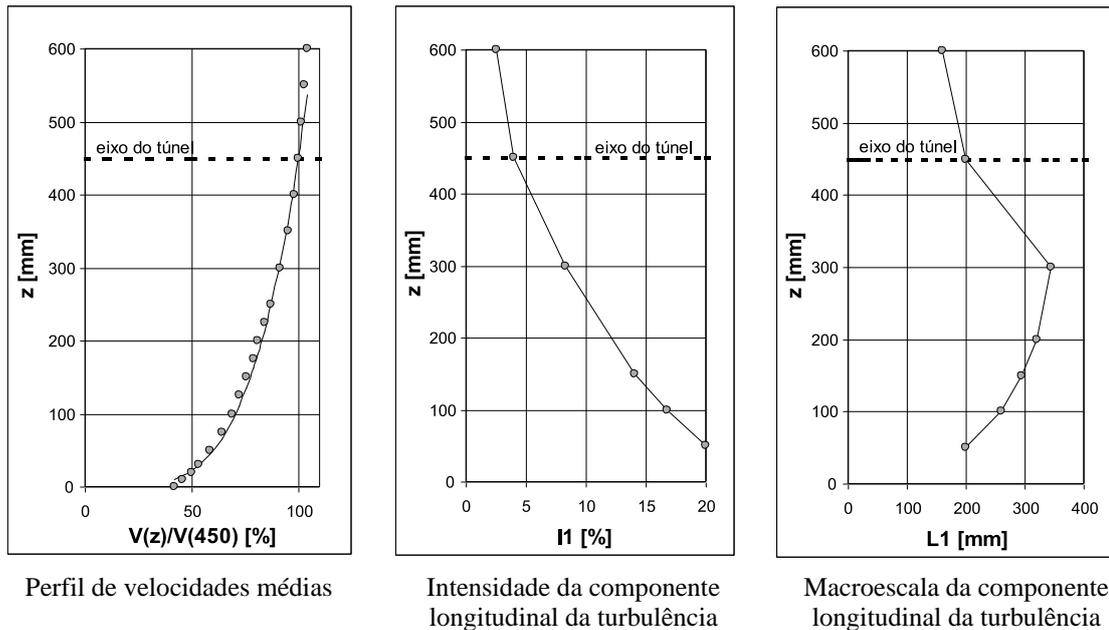


Figura 16 - Características do vento deslizante e turbulento simulado - expoente $p = 0,23$.

4.3 ENSAIOS DE INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA

Loredo-Souza et al (2003) afirmam que edificações situadas nas proximidades podem causar efeitos ponderáveis de interação, aumentando as sucções, forças e momentos torsores no edifício objeto de estudo.

Reconhecendo a importância da estimativa dos efeitos da interferência de prédios vizinhos, a Standards Association of Australia (1989) incorporou um breve procedimento sobre o tema, sob a forma de nota de advertência: “... O escoamento no entorno de qualquer estrutura, inserida em um conjunto, irá diferir do escoamento sobre uma estrutura isolada, gerando diferentes forças... Os efeitos da interferência são evidenciados em estruturas localizadas a uma distância menor que 10 vezes a dimensão da estrutura normal à ação do vento.”

Em acordo a estas recomendações, foi possível definir um conjunto de configurações de ensaio que permitisse mensurar a influência de um modelo vizinho no escoamento do vento que incide sobre o modelo estudado, tanto para o ensaio de pressões estáticas, quanto para o ensaio de medição direta das velocidades.

Foram definidas, então, distâncias de vizinhança, conforme é detalhado na Tabela 5. A distância referida pela norma australiana, de 10 vezes a dimensão da face normal à ação do vento, a qual não apresenta interferência considerável, correspondem aos ensaios com o modelo isolado, ou seja, sem a presença de vizinho.

Tabela 5 – Distâncias para os ensaios de interferência de vizinhança.

Dimensão	Protótipo (m)	Modelo (m)
a	100	0,50
b	50	0,25
$0,5b$	25	0,125
$1b$	50	0,25
$2b$	100	0,50
$4b$	200	1,00
isolado	1000	5,00

A Figura 17 mostra a disposição do modelo fixado à mesa giratória M-II, na câmara de ensaios do túnel de vento. A medida s é a distância entre o modelo reduzido e o modelo adicional, confeccionado com as mesmas proporções geométricas do modelo instrumentado. A Tabela 6 indica as configurações para ambos os ensaios, considerando as diferentes distâncias s para o prédio vizinho ao modelo.

As medições foram feitas para o ângulo de incidência do vento de 90° para todas as configurações de ensaio, considerada situação de maior interferência por parte do modelo vizinho.

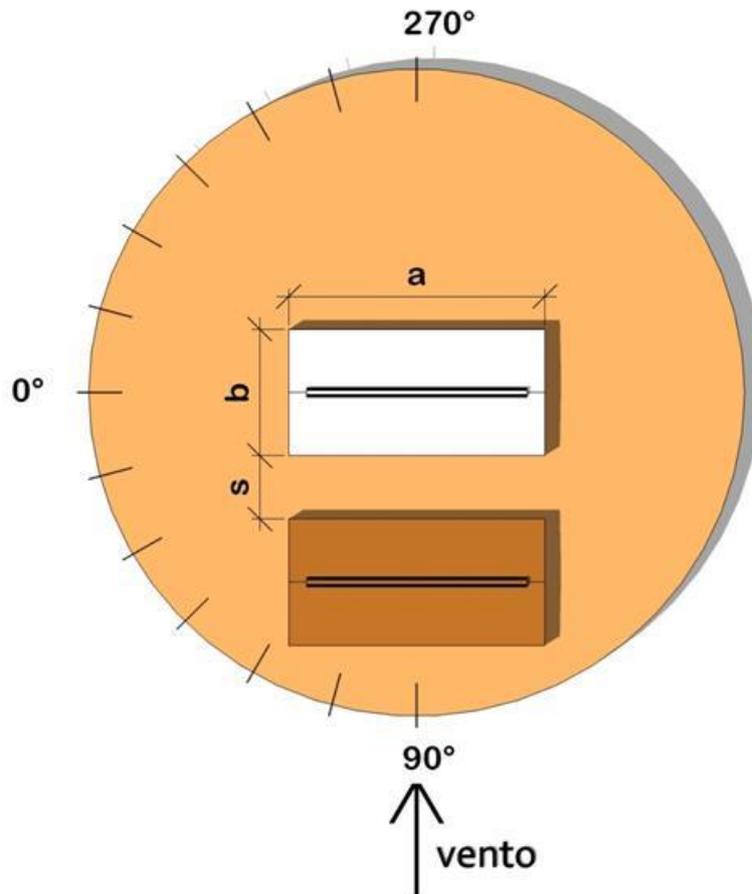


Figura 17 - Aspecto da mesa do túnel de vento e disposição do modelo instrumentado (branco) e do modelo vizinho, a uma distância s .

Tabela 6 - Definição das configurações de ensaio de acordo com o tipo de ensaio e a posição da vizinhança (ângulo de incidência = 90°).

Tipo de ensaio	s (m)				
	$0,5b$ (0,125)	$1b$ (0,25)	$2b$ (0,50)	$4b$ (1,00)	<i>modelo isolado</i>
Determinação dos coeficientes de pressão externa (tempo de aquisição = 16s)	Configuração 01	Configuração 02	Configuração 03	Configuração 04	Configuração 05
Medição de velocidades do ar (tempo de aquisição = 32s)	Configuração 06	Configuração 07	Configuração 08	Configuração 09	Configuração 10
Janelas dos oitões e portões fechados.					

4.4 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA

Para que fossem determinados os coeficientes de pressão externa atuantes no pavilhão industrial, foi necessária a confecção de um modelo reduzido fechado, com a inserção de tomadas de pressão na altura das janelas, assim como distribuídas em diversos pontos do exaustor de cumeeira, das paredes e da cobertura. O modelo reduzido do pavilhão industrial foi confeccionado na escala geométrica 1:200, possuindo as seguintes dimensões:

- Largura = 0,25m;
- Comprimento = 0,50m;
- Altura total – nível da cumeeira = 0,05m;
- Altura total – nível superior do exaustor natural de cumeeira = 0,065m.

A Figura 18 apresenta o modelo e suas dimensões principais.

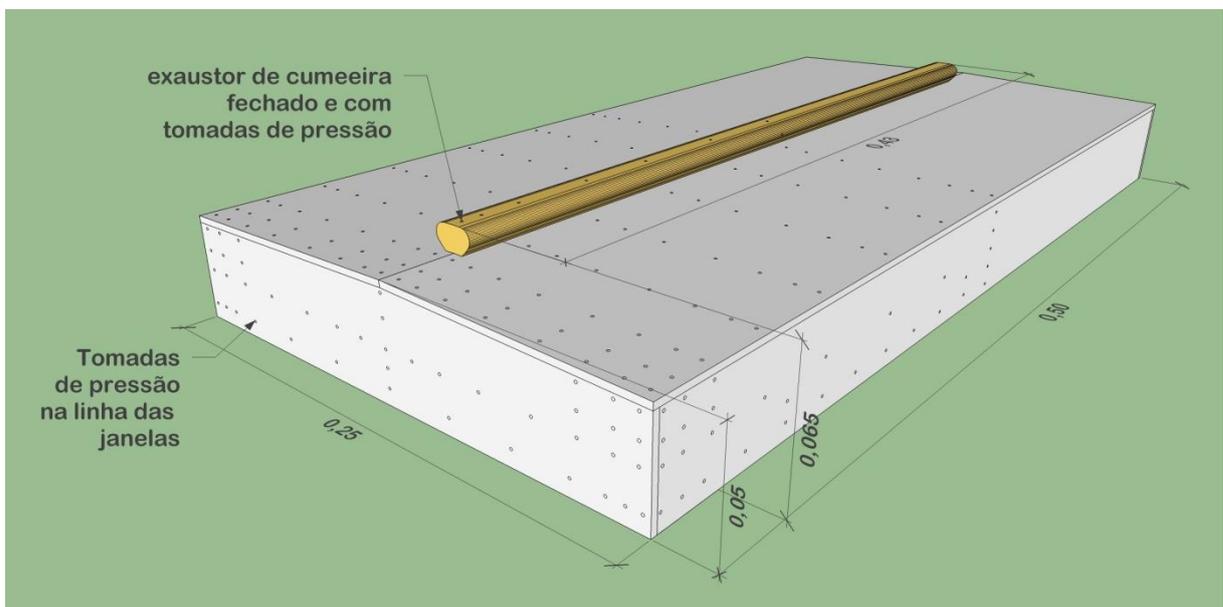


Figura 18 - Modelo fechado, com representação das tomadas de pressão.
dimensões em metros [m]

Ao contrário dos modelos executados por Silvani (2005) e Nunes (2006), cuja distribuição das tomadas de pressão foi feita em um quadrante apenas, o modelo para os ensaios de interferência de vizinhança exigiu um maior número de tomadas, distribuídas na metade de sua área, como mostram as Figuras 19 à 22.

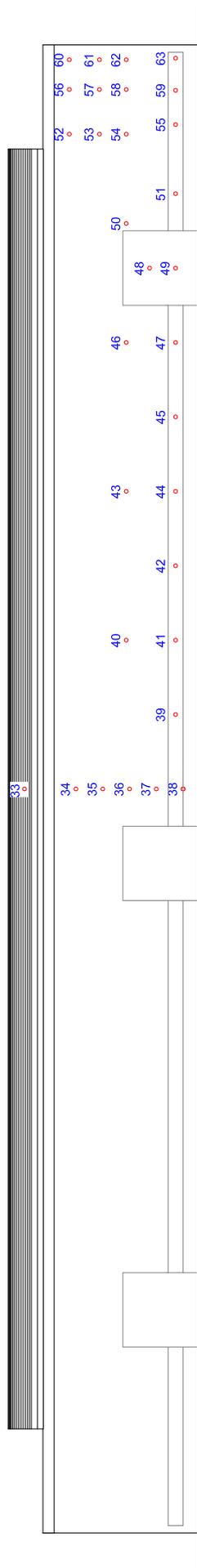


Figura 19 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão na fachada a barlavento.

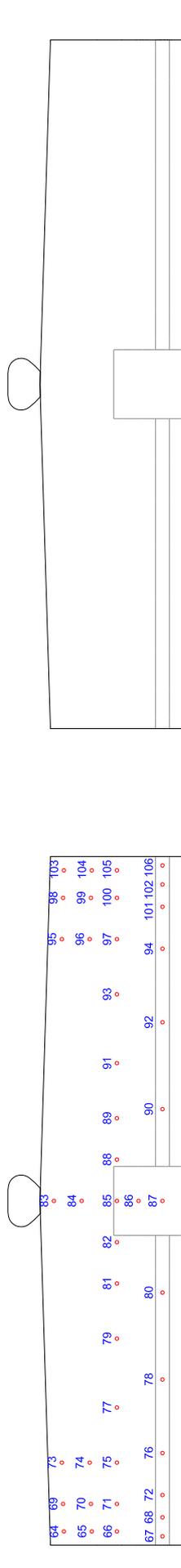


Figura 20 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão nas fachadas dos oitões.

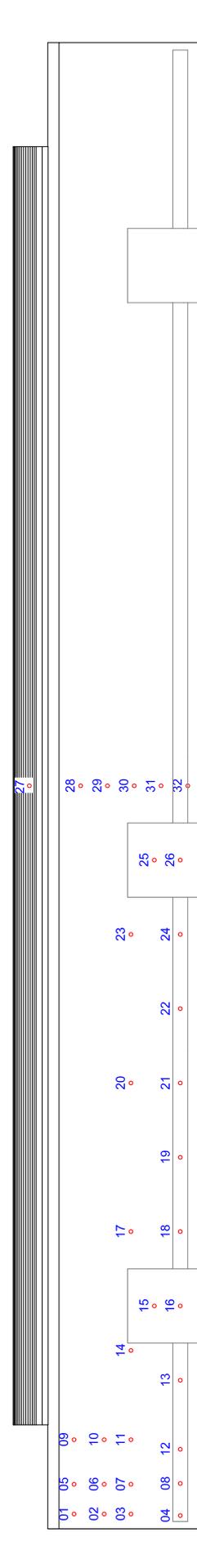


Figura 21 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão na fachada a sotavento.

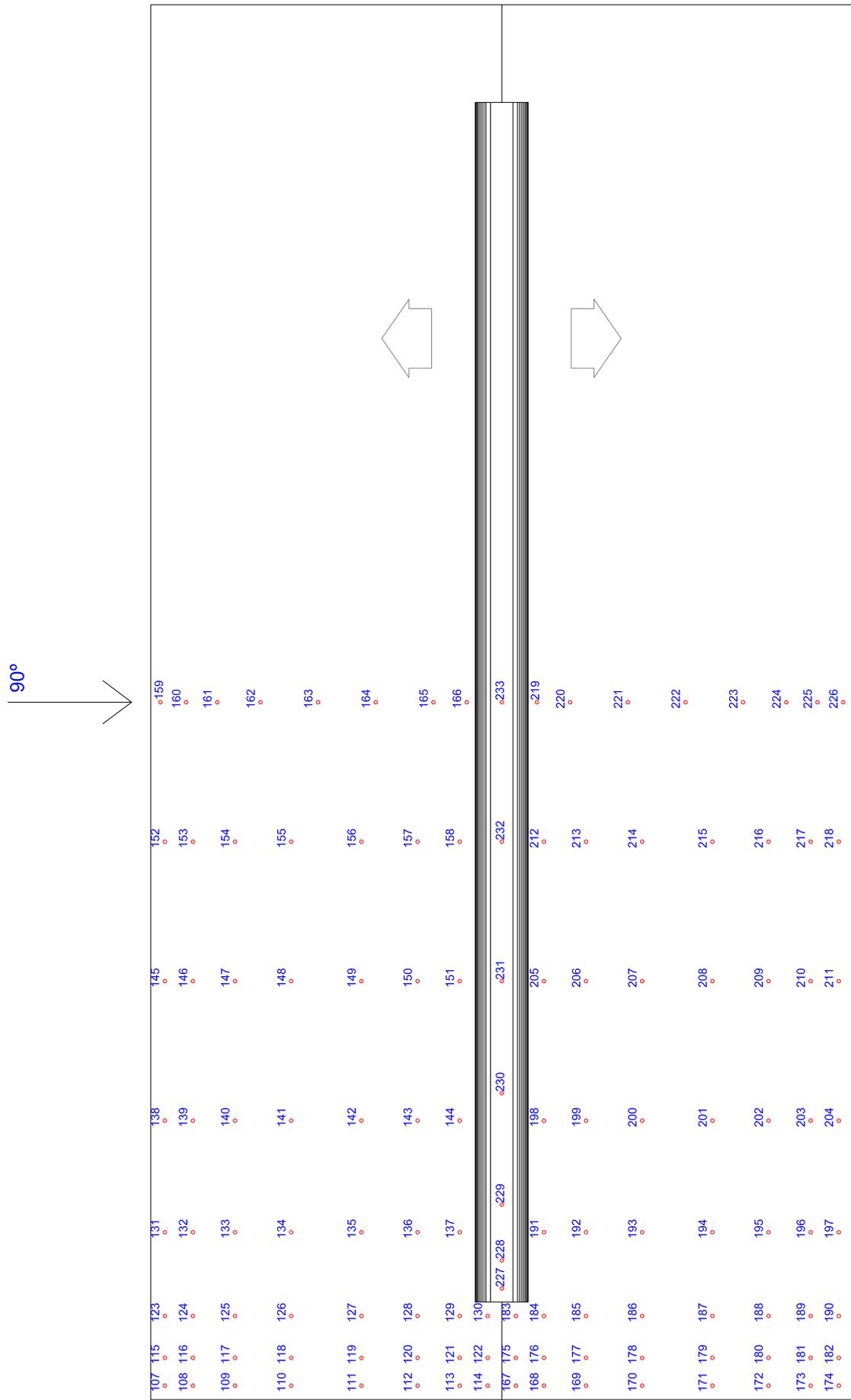


Figura 22 - Posicionamento e numeração das tomadas de pressão da cobertura e exaustor natural de cumeeira.

Gustavo Menna Barreto Klein (gustavombklein@gmail.com) Dissertação. Porto Alegre. PPGEC/UFRGS, 2012.

O modelo foi executado em chapas de acrílico, sendo o recorte de suas peças feito a laser, o que conferiu grande precisão para suas medidas e maior facilidade na sua montagem. A Figura 23 apresenta a separação das peças para montagem dos dois tipos de modelos, o com tomadas de pressão e o com aberturas.



Figura 23 - Preparação para montagem dos modelos reduzidos.

A montagem do modelo teve o cuidado em manter as arestas vivas de suas faces, assim como uma colagem que garantisse a vedação completa entre as peças, para assegurar um comportamento do escoamento do vento o mais próximo possível das condições apresentadas na edificação real.

As tomadas de pressão do modelo são constituídas por mangueiras de PVC, com aproximadamente 1,20m de comprimento e diâmetro interno de 1,0mm, sendo fixadas no modelo através de furos de 1,3mm de diâmetro feitos nas peças de acrílico. Para fixação, as mangueiras foram aquecidas, afinadas e inseridas nos furos das peças em acrílico.

Posteriormente foi feito o corte das rebarbas, para perfeito alinhamento das mesmas com a superfície instrumentada.

A Figura 24 mostra em detalhe a numeração e a fixação das mangueiras no modelo reduzido.

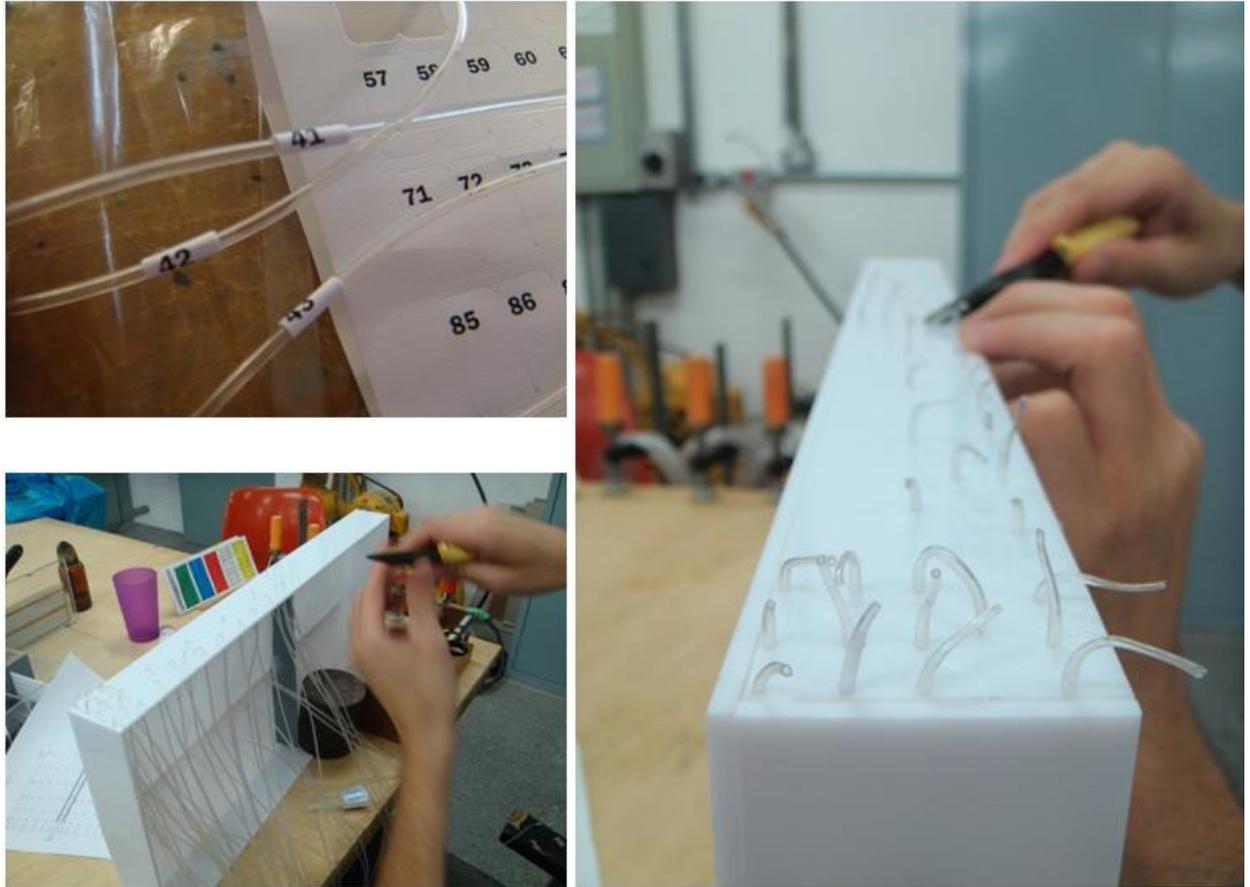


Figura 24 - Mangueiras de PVC: numeração e colocação no modelo.

A Figura 25 apresenta o processo de montagem do modelo, assim como seu aspecto final, juntamente com o modelo vizinho, posicionado na base a ser ensaiada na Mesa II do túnel de vento.



Figura 25 - Detalhe da montagem do modelo e na mesa de ensaio, com modelo vizinho.

As mangueiras foram ligadas, através de um conector (engate rápido), aos transdutores elétricos de pressão do túnel, de marca SCANIVALVE.

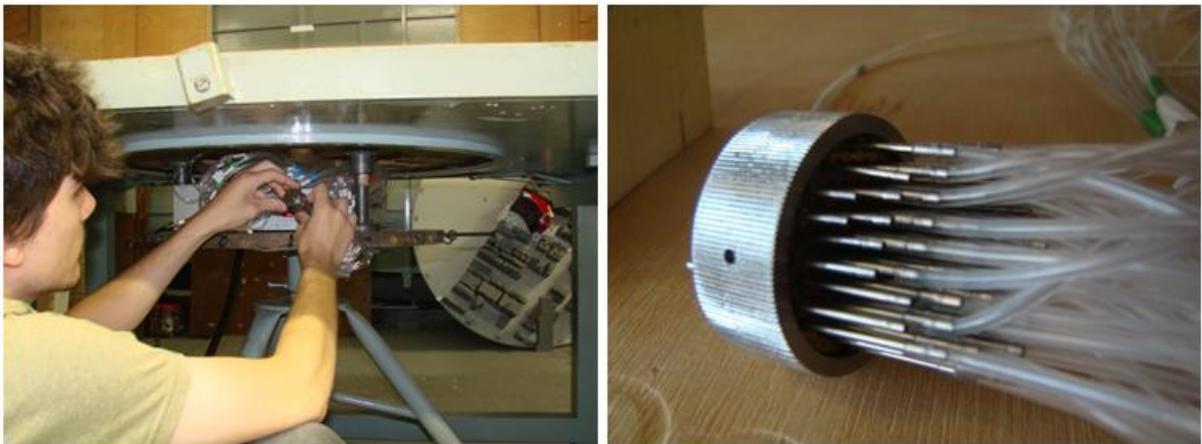


Figura 26 - Detalhe do engate rápido, peça responsável pela conexão das mangueiras aos transdutores elétricos de pressão do túnel (SCANIVALVE).

O equipamento presente no túnel pode registrar as pressões de até 384 tomadas de forma simultânea, sendo estes dados armazenados em um computador.

Além dos diferenciais de pressão no modelo (Δp), o sistema pode adquirir outras informações importantes, como a pressão de referência (Δp_a), obtida pela leitura da diferença de pressão entre os anéis piezométricos no interior do túnel, a temperatura interna (T_e) e a pressão absoluta atmosférica no momento do ensaio (p_e).

A Figura 27 mostra os equipamentos utilizados durante os ensaios.



Figura 27 - Sistema de aquisição de dados dos ensaios: computador (lado esquerdo), ManoAir e barômetro.

Inserido o modelo no interior do túnel, os equipamentos são ligados, zerados e regulados para uma taxa de aquisição de 16 segundos. O túnel é acionado (frequência de 30Hz) e a aquisição é feita após um período de estabilização do escoamento do vento, que ocorre após 1 minuto. Este processo é repetido para cada ângulo de incidência do vento e para cada configuração de vizinhança.

A Figura 28 apresenta um aspecto geral do ensaio, cujo modelo foi submetido a ventos deslizantes e turbulentos com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p = 0,23$, correspondendo a terreno com rugosidade entre as **Categorias III e IV** da NBR-6123. Foram ensaiadas 5 configurações de vizinhança ($0,5b$, $1b$, $2b$, $4b$ e $10b$) para o ângulo de incidência do vento de 90° .



Figura 28 - Modelo inserido na Mesa II do túnel, com vizinho a uma distância $0,5b$.

Valores complementares ao ensaio, como da pressão de referência, da temperatura no interior do túnel, da pressão absoluta atmosférica e da hora da gravação dos arquivos de aquisição foram anotados em planilhas de ensaio. A Tabela 7 apresenta estas informações.

Tabela 7 - Dados complementares obtidos durante os ensaios.

Configuração	Temperatura [°C]	Pressão absoluta [kPa]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]
0,5b	25,60	100,65	25,80	253,01
1b	27,00	100,68	25,70	252,03
2b	27,70	100,75	25,60	251,05
4b	27,70	100,75	25,60	251,05
isolado	27,90	100,78	25,80	253,01

Com base nos valores complementares ao ensaio foram calculados os valores de massa específica do ar e as pressões dinâmicas para a velocidade de 2m/s para cada uma das configurações, os quais são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Pressões dinâmicas de referência para a velocidade de 2 m/s.

Configuração	Vref [m/s]	ρ_{ar} [kg/m ³]	q [Pa]
0,5b	2,00	1,17	2,34
1b	2,00	1,16	2,33
2b	2,00	1,16	2,32
4b	2,00	1,16	2,32
isolado	2,00	1,16	2,32

Os dados brutos obtidos nos ensaios são armazenados separadamente por configuração de vizinhança (*0,5b*, *1b*, *2b*, *4b* e *10b*), processados no programa MATLAB e inseridos em planilha eletrônica que, através da Equação 9, permite obter-se os coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$).

As Tabelas 9 à 11 mostram os coeficientes obtidos nos ensaios, para o ângulo de incidência do vento de 90° e para uma velocidade de 2 m/s.

Tabela 9 – Coeficientes de pressão – Fachada a barlavento.

Aberturas Fachada a Barlavento (A)					
Tomada	<i>0,5b</i>	<i>1b</i>	<i>2b</i>	<i>4b</i>	<i>isolado</i>
38	-1,76	0,69	2,17	3,84	4,13
39	-2,25	0,85	2,16	4,09	3,89
41	-2,11	0,63	2,09	3,52	3,90
42	-1,87	0,86	2,30	4,07	4,09
44	-1,35	0,67	2,25	4,33	4,04
45	-1,24	0,94	2,51	3,89	4,18
47	-0,88	1,20	2,50	3,77	4,00
49	-0,02	1,39	2,42	3,97	3,93
51	0,46	1,56	2,37	3,66	3,69
55	0,37	1,04	1,45	2,68	2,44
59	0,60	0,43	0,42	1,29	1,13
63	-1,18	-1,97	-3,14	-2,83	-3,55

Tabela 10 – Coeficientes de pressão – Fachada a sotavento.

Aberturas Fachada a Sotavento (B)					
Tomada	<i>0,5b</i>	<i>1b</i>	<i>2b</i>	<i>4b</i>	<i>isolado</i>
4	-2,32	-2,41	-2,51	-2,31	-2,39
8	-2,55	-2,38	-2,50	-2,44	-2,40
12	-2,46	-2,42	-2,54	-2,38	-2,43
13	-2,39	-2,43	-2,54	-2,32	-2,43
16	-2,30	-2,38	-2,47	-2,34	-2,34
18	-2,39	-2,36	-2,47	-2,29	-2,39
19	-2,45	-2,35	-2,46	-2,29	-2,38
21	-2,33	-2,28	-2,36	-2,22	-2,28
22	-2,23	-2,20	-2,29	-2,14	-2,21
24	-2,32	-2,25	-2,34	-2,15	-2,25
26	-2,46	-2,24	-2,35	-2,19	-2,28
32	-2,27	-2,27	-2,34	-2,22	-2,25

Tabela 11 – Coeficientes de pressão – Exaustor natural de cumeeira.

Exaustor					
Tomada	<i>0,5b</i>	<i>1b</i>	<i>2b</i>	<i>4b</i>	<i>isolado</i>
227	-11,64	-11,08	-11,50	-11,76	-11,76
228	-12,23	-11,92	-12,13	-11,52	-12,26
229	-11,90	-11,77	-11,71	-11,06	-11,46
230	-11,26	-11,16	-11,46	-10,81	-11,32
231	-11,02	-11,33	-11,69	-11,05	-11,51
232	-11,37	-11,85	-12,44	-11,78	-12,41
233	-11,26	-12,01	-12,22	-11,28	-11,78

As Figuras 29 e 30 apresentam as distribuições dos coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) obtidos durante os ensaios, ao longo das fachadas, cobertura e exaustor natural de cumeeira do pavilhão.

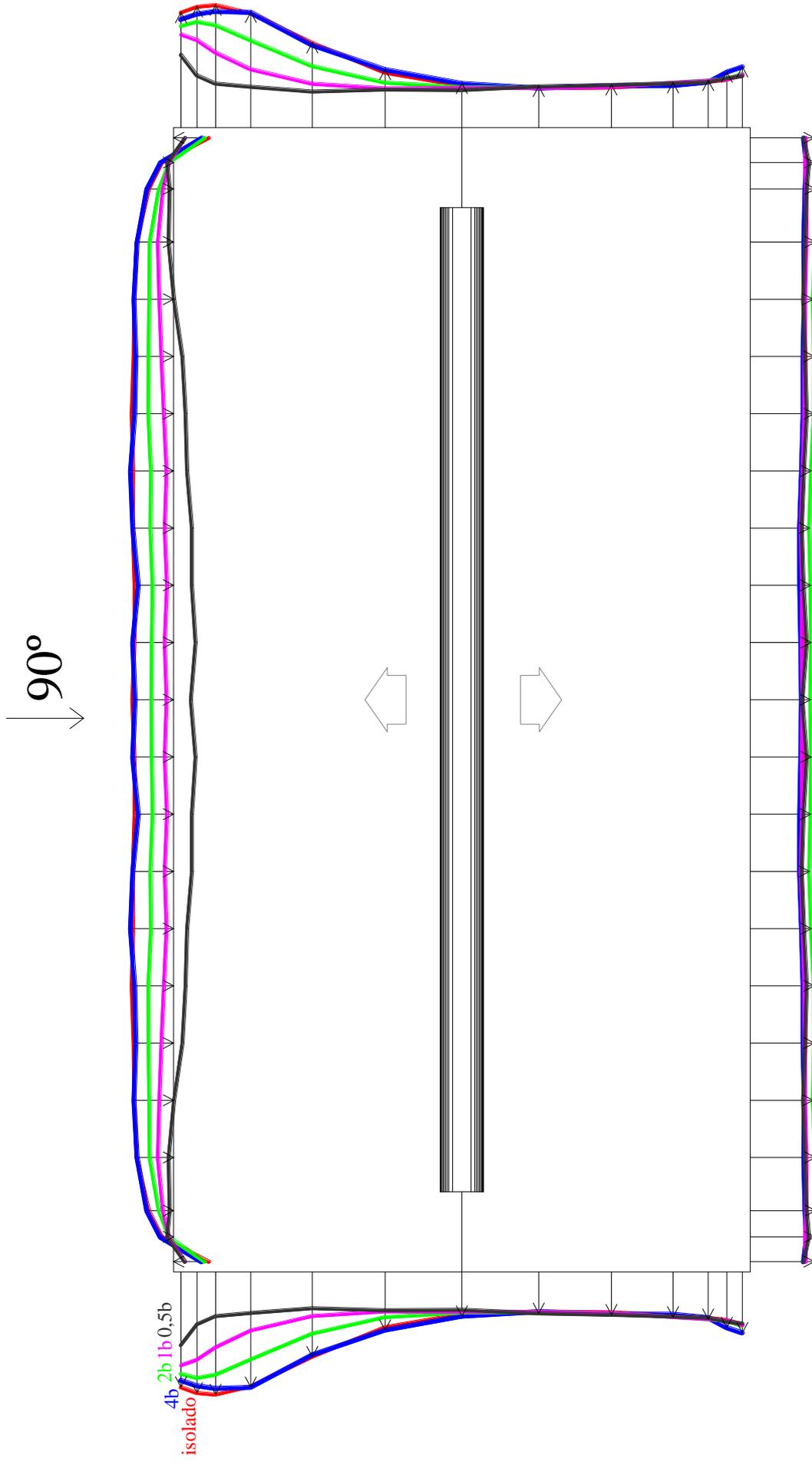


Figura 29 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa – Planta baixa.

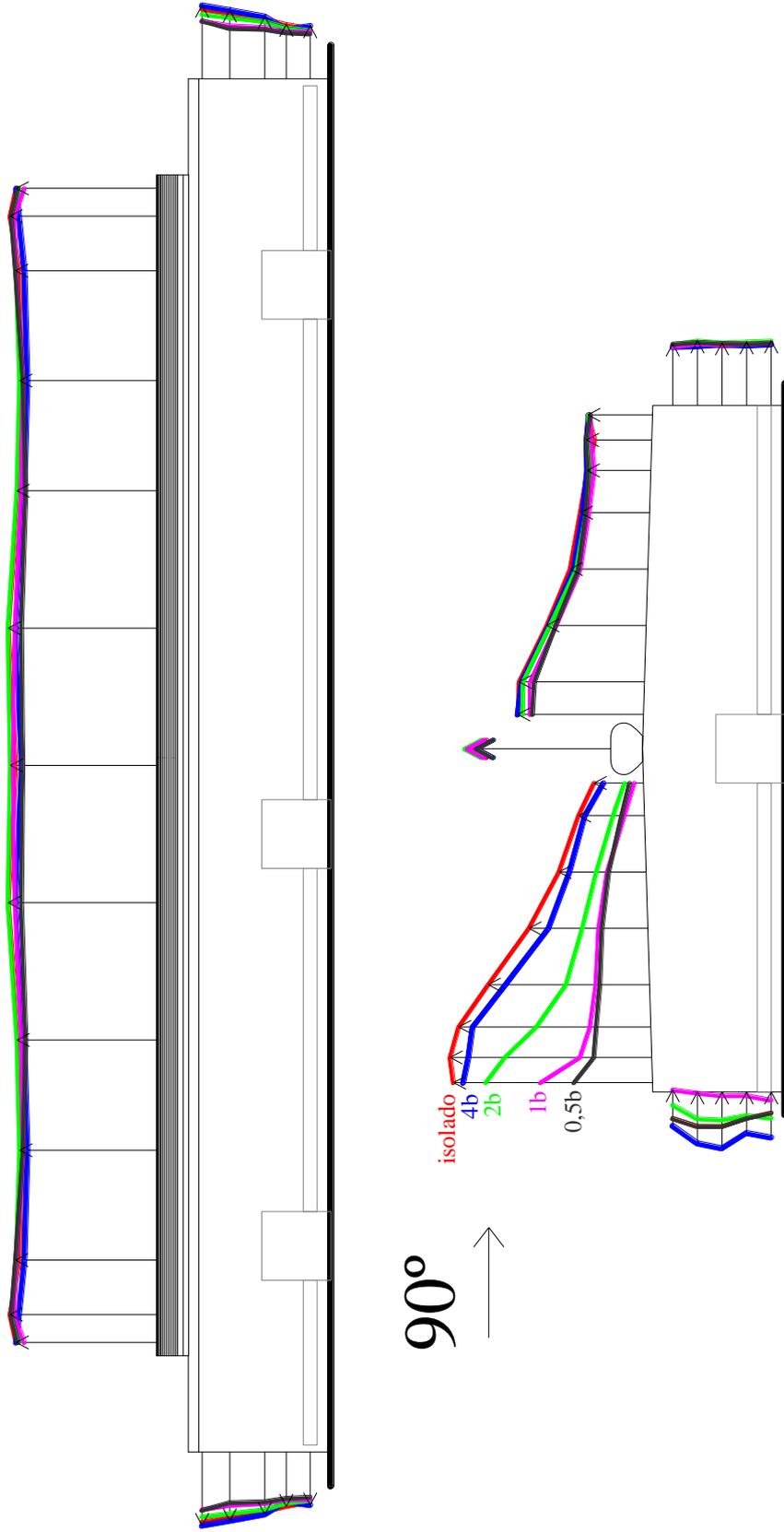


Figura 30 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa – Seções longitudinal e transversal.

Após obtidos os valores para os coeficientes de pressão externos ($c_{p,e}$), para cada tomada de pressão, calculou-se os coeficientes médios para cada abertura, através da Equação 10.

Posteriormente, obteve-se os coeficientes de forma (C_e) para cada face instrumentada (Equação 11), necessário para a determinação dos coeficientes de pressão interna ($c_{p,i}$). A Tabela 12 mostra os valores dos coeficientes de pressão externa médios ($c_{pe,medio}$) para cada abertura e os respectivos coeficientes de forma (C_e).

Tabela 12 – Coeficientes de pressão médios para cada abertura e coeficientes de forma.

Fachada A			Área		83,45
Abertura	0,5b	1b	2b	4b	isolado
5	0,0371	0,1098	0,1528	0,3071	0,2814
6	-0,4465	0,2570	0,6978	1,1725	1,2108
7	-0,6873	0,3493	0,9577	1,6485	1,6919
8	0,0342	0,0999	0,1377	0,2838	0,2579
Ce	-1,0625	0,8161	1,9459	3,4118	3,4421

Fachada B			Área		83,45
Abertura	0,5b	1b	2b	4b	isolado
1	-0,3494	-0,3467	-0,3635	0,3387	-0,3478
2	-0,7017	-0,6851	-0,7143	0,6647	-0,6896
3	-0,9855	-0,9555	-0,9958	0,9292	-0,9611
4	-0,3341	-0,3312	-0,3472	0,3239	-0,3323
Ce	-2,3707	-2,3185	-2,4208	2,2565	-2,3308

Exaustor			Área		137,96
Abertura	0,5b	1b	2b	4b	isolado
9	-2,5733	-2,5313	-2,5723	2,4503	-2,5516
Ce	-2,5733	-2,5313	-2,5723	2,4503	-2,5516

Os coeficientes de pressão interna ($c_{p,i}$) para cada configuração de vizinhança, determinados a partir da Equação 17, são apresentados a seguir. A determinação a partir dos coeficientes fornecidos pela NBR 6123 consideraram o modelo isolado e ângulo de incidência de 90°. O cálculo pode ser feito com aproximações sucessivas, arbitrando-se valores de C_i . A Tabela 13 mostra o resultado destes cálculos.

Tabela 13 – Determinação dos coeficientes de pressão interna ($c_{p,i}$) a partir da NBR 6123/88.

isolado			C_i	
Abertura	Área	C_e	-0,54765	
			$C_e - C_i$	$+ -A \sqrt{(C_e - C_i)}$
A	83,45	0,70	1,25	93,21
B	83,45	-0,50	0,05	18,22
Exaustor	137,96	-1,20	-0,65	-111,42
			$\sum Q$	0,0031

>>>> $c_{p,i} = -0,548$

Norma não contempla o caso do exaustor de cumeeira

Ângulo da cobertura 2° (considerado 5°)

Os cálculos para $c_{p,i}$, a partir dos valores obtidos em ensaios, utilizam os valores de C_e apresentados na Tabela 12. As Tabelas 14 à 18 mostram o resultado final da sequência de cálculo.

Tabela 14 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 0,5b.

0,5b			C_i	
Local	Área	C_e	-2,3045	
			$C_e - C_i$	$+ -A \sqrt{(C_e - C_i)}$
A	83,45	-1,0625	1,2420	93,00
B	83,45	-2,3707	-0,0662	-21,47
Exaustor	137,96	-2,5733	-0,2688	-71,53
			$\sum Q$	0,0008

>>>> $c_{p,i} = 2,305$

Tabela 15 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 1b.

1b			C_i	
Local	Área	C_e	-2,0385	
			$C_e - C_i$	$+ -A \sqrt{(C_e - C_i)}$
A	83,45	0,8161	2,8546	140,99
B	83,45	-2,3185	-0,2800	-44,16
Exaustor	137,96	-2,5313	-0,4928	-96,84
			$\sum Q$	-0,0098

>>>> $c_{p,i} = 2,039$

Tabela 16 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 2b.

2b			Ci	
Local	Área	Ce	-1,9581	
			Ce - Ci	+ -A √(Ce-Ci)
A	83,45	1,9459	3,9040	164,89
B	83,45	-2,4208	-0,4627	-56,76
Exaustor	137,96	-2,5723	-0,6142	-108,12
			∑ Q	0,0048

>>>> $c_{p,i} = 1,958$

Tabela 17 – Coeficientes de pressão interna para a configuração 4b.

4b			Ci	
Local	Área	Ce	-1,6544	
			Ce - Ci	+ -A √(Ce-Ci)
A	83,45	3,41	5,0662	187,83
B	83,45	-2,26	0,6021	-64,75
Exaustor	137,96	-2,45	0,7959	-123,07
			∑ Q	0,0028

>>>> $c_{p,i} = 1,654$

Tabela 18 – Coeficientes de pressão interna para a configuração *modelo isolado*.

isolado			Ci	
Local	Área	Ce	-1,7295	
			Ce - Ci	+ -A √(Ce-Ci)
A	83,45	3,4421	5,1716	189,77
B	83,45	-2,3308	0,6013	-64,71
Exaustor	137,96	-2,5516	0,8221	-125,08
			∑ Q	-0,0181

>>>> $c_{p,i} = 1,730$

A partir dos ensaios de pressões, pode-se perceber que a proximidade do modelo vizinho gerou variações diversas, conforme a orientação da fachada em relação ao ângulo de incidência do vento.

Na fachada a barlavento, as pressões positivas (sobrepessões) diminuíram de forma linear com a proximidade do modelo vizinho para as distâncias 1b, 2b, 4b e *isolado*. Para a configuração 0,5b, o desempenho foi diferente. A Figura 31 mostra este comportamento.

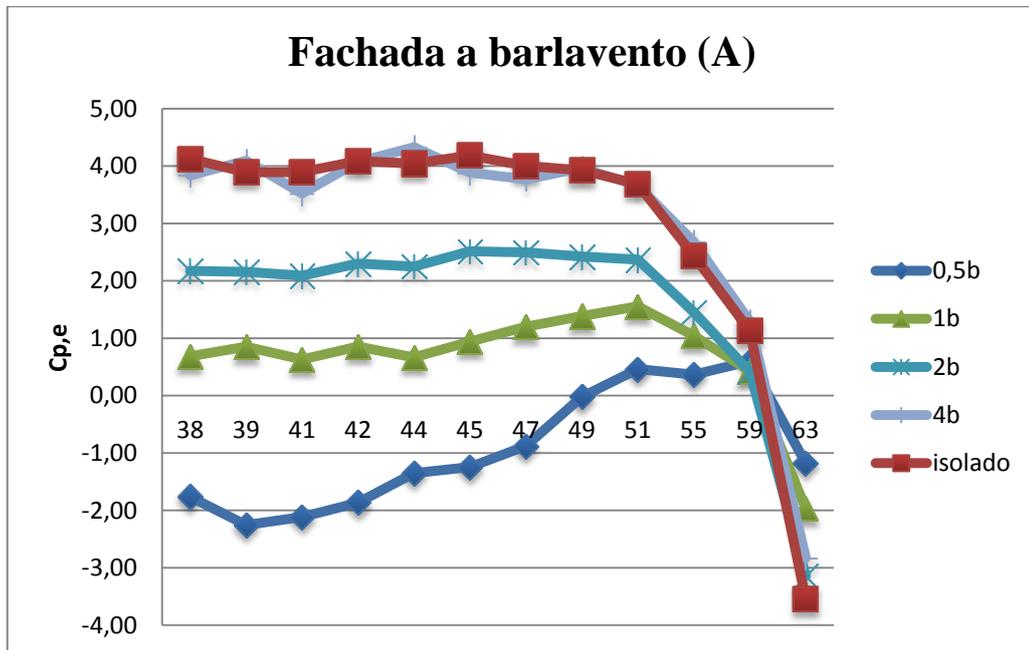


Figura 31 - Coeficientes de pressão – Fachada a barlavento.

Por haver variações nos coeficientes de pressão nesta fachada, pode-se deduzir que a presença do modelo vizinho, para as distâncias $1b$, e $2b$, gera grande interferência no escoamento do vento. Neste caso não há espaço suficiente para a formação completa da esteira, porém a separação é muito grande para que possa existir um vórtice estável, podendo-se caracterizar o comportamento do vento como em regime de escoamento de interferência de esteira.

Ainda na **fachada a barlavento**, para a configuração $0,5b$, ocorreram pressões muito pequenas e, inclusive, inversão de sinal (sucções). Isto significa que os modelos estão suficientemente próximos de tal forma que o efeito de proteção é grande, encontrando-se o modelo mergulhado na esteira do vizinho. Um vórtice estável pode se formar no espaço entre eles e o escoamento parece saltar ou deslizar por sobre o topo dos edifícios. Tais características definem o vento como em regime de escoamento deslizante.

Para as configurações $4b$ e *isolado*, o modelo vizinho oferece pouca ou nenhuma interferência no modelo ensaiado, pois os mesmos estão suficientemente afastados de tal forma que cada um atua isoladamente. Um vórtice de pé de fachada forma-se em torno de cada edifício individualmente e o escoamento posterior à esteira recola ao solo, antes de atingir o modelo.

Neste caso, a distância de separação é maior do que a soma dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sotavento.

O efeito de proteção neste caso é menor e as forças em cada edifício individualmente são similares aos valores correspondentes ao modelo isolado. Tais características definem o regime de escoamento de corpo isolado.

Através da Figura 31 pode-se, ainda, perceber a inversão de sentido que as pressões sofreram entre as tomadas 59 e 63, devido às sucções presentes próximas às quinas da fachada.

Na **fachada a sotavento**, na região da esteira do modelo, as pressões externas não apresentaram alterações consideráveis para as diferentes configurações, indicando que a presença da vizinhança, para um ângulo de incidência de 90°, não produz uma interferência considerável no escoamento a sotavento no modelo. A Figura 32 apresenta estas variações de pequena magnitude.

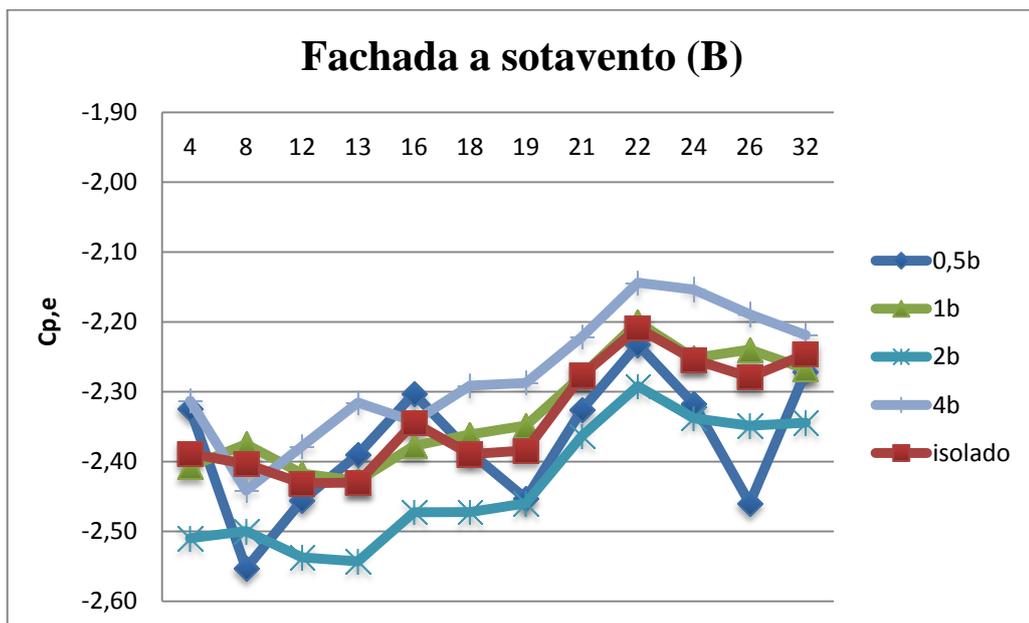


Figura 32 - Coeficientes de pressão – Fachada a sotavento.

Finalmente, a distribuição das pressões externas no **exaustor natural de cumeeira**, não apresentou grande variação, estando o mesmo localizado na cobertura e mergulhado em uma zona permanente de sucções. Pode-se observar, na Figura 33, que nas configurações *2b* e

isolado as tomadas de pressão apresentaram os maiores valores negativos para seus coeficientes de pressão.

O exaustor, juntamente com a quina entre a cobertura e a fachada a barlavento, são as áreas que apresentaram as maiores sucções durante os ensaios.

Este fato é importante, na medida em que é através desta pressão negativa que o exaustor cumpre sua função de retirar o ar de dentro do pavilhão.

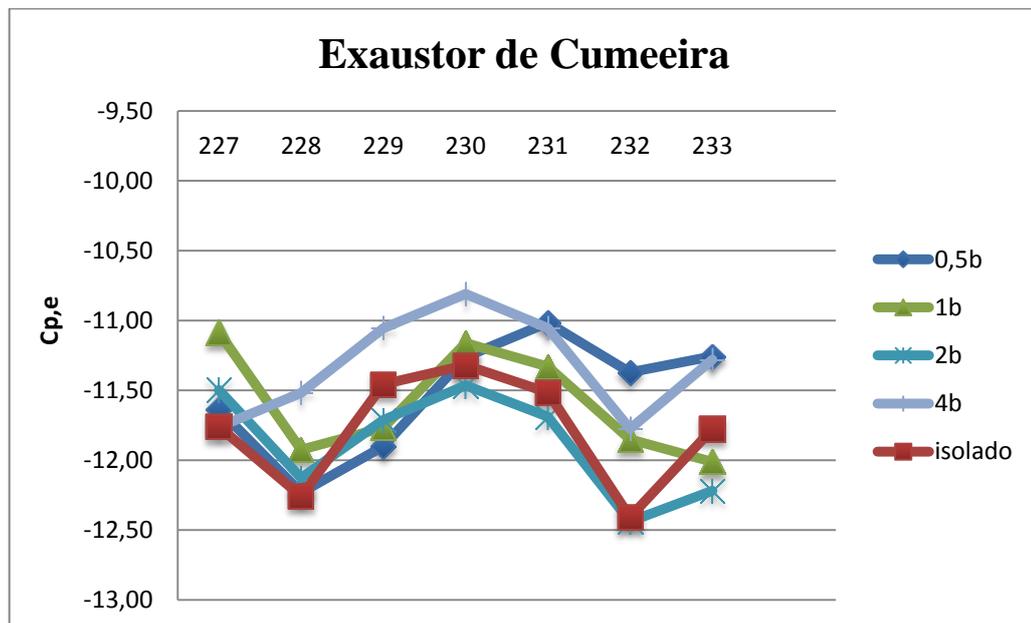


Figura 33 - Coeficientes de pressão – Exaustor natural de cumeeira.

A determinação das vazões de ventilação a partir dos coeficientes de pressão, obtidos nos ensaios, é apresentada no Capítulo 5, assim como uma análise comparativa dos resultados obtidos através dos diversos métodos de cálculo.

4.5 ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO DO AR

A determinação da vazão de ventilação por efeito dos ventos pode ser obtida através de vários métodos, como através de modelos teóricos ou por ensaio que determine a distribuição dos coeficientes de pressão nas zonas onde serão localizadas as aberturas, ambos apresentados nos capítulos anteriores deste estudo. Outra maneira de se determinar a vazão de ventilação por efeito dos ventos é através de ensaios de medição direta da velocidade nas aberturas.

Conhecendo-se a velocidade pode-se calcular a vazão e possivelmente, formar uma imagem do padrão das linhas de corrente, ao identificar regiões de escoamento separado, regiões de escoamento estagnado e outras características do escoamento do vento.

Buscando uma melhor compreensão das possíveis alterações no escoamento do vento por influência da vizinhança, foi projetado um segundo modelo reduzido, em escala 1:200, semelhante ao utilizado no ensaio descrito anteriormente, porém com as aberturas das janelas e exaustor de cumeeira livres para a passagem do ar.

A Figura 34 apresenta um aspecto geral do modelo utilizado para o ensaio de medição direta das velocidades de escoamento nas aberturas.

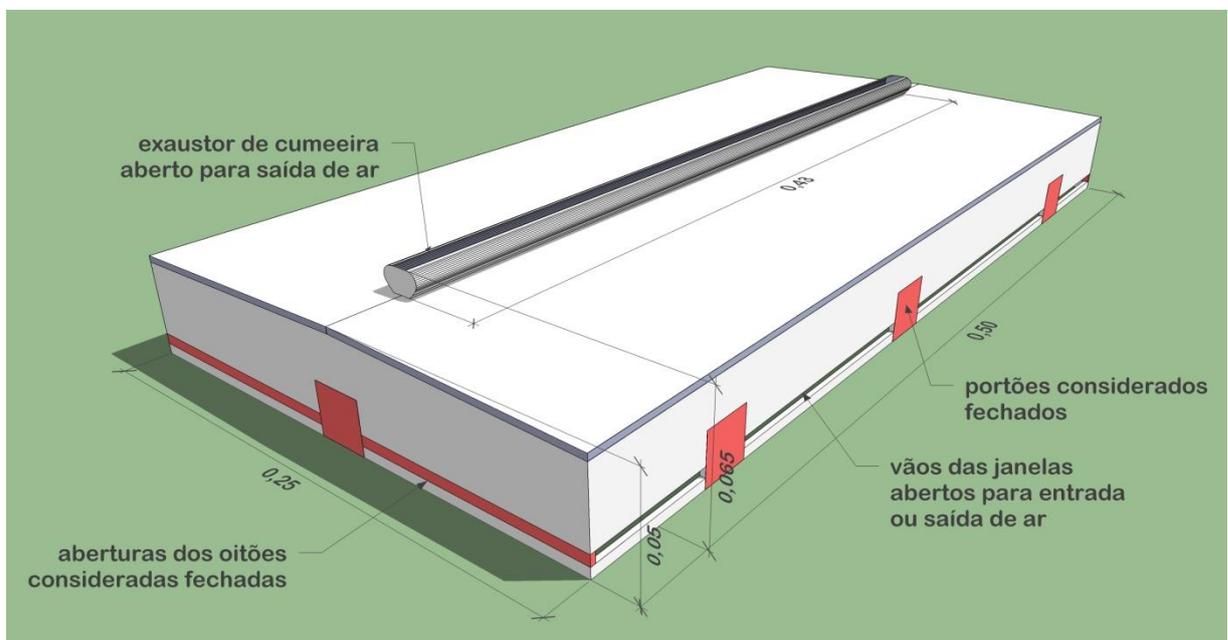


Figura 34 - Modelo com as janelas e o exaustor abertos, para medição direta das velocidades de escoamento do vento.

dimensões em metros [m]

A Figura 35 apresenta o modelo construído, na mesa de ensaio, juntamente com modelo vizinho, de iguais características, além de detalhes da execução do exaustor natural de cumeeira.

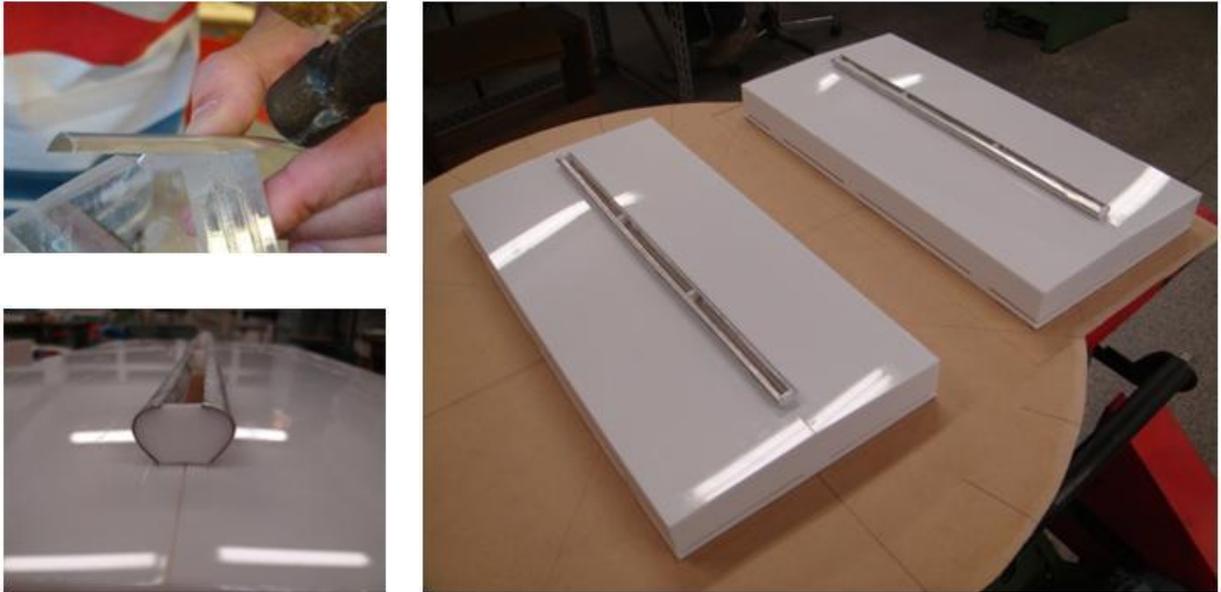


Figura 35 - Detalhes do exaustor e modelo pronto com vizinho, distância $0,5b$.

A Figura 36 mostra uma planta baixa esquemática do pavilhão, com a indicação da numeração e respectivas áreas das aberturas.

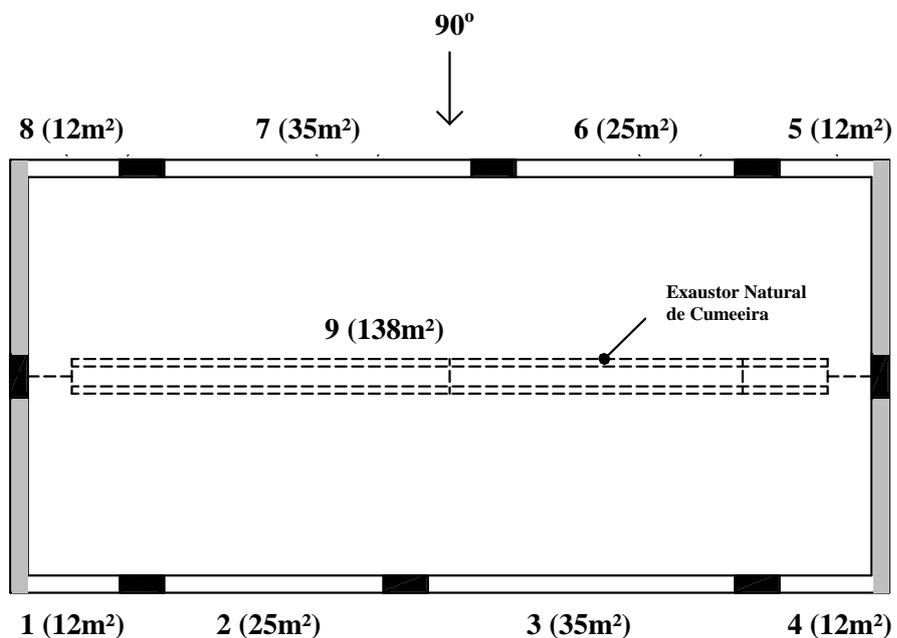


Figura 36 - Numeração e respectivas áreas das aberturas do protótipo.

Fonte: Nunes (2006).

As áreas preenchidas em preto correspondem aos portões e as áreas em cinza são as aberturas das fachadas menores (oitões) que foram consideradas fechadas.

Através das aberturas, foi medida a velocidade média local do escoamento por intermédio de anemômetros de fio quente.

Para este fim, foram instaladas três sondas (anemômetros) em cada uma das principais aberturas do modelo, fixadas de forma perpendicular ao escoamento em cada abertura, permitindo a medição das velocidades médias pontuais de entrada ou saída de ar nas mesmas, conforme mostra a Figura 37.



Figura 37 - Posicionamento e fixação das sondas no modelo.

Os pontos de localização das sondas no modelo são mostrados nas Figuras 38 à 40. A sonda 1 foi fixada dentro do modelo, na fachada a barlavento, junto à abertura 07. A sonda 2 foi posicionada fora do modelo, na fachada a sotavento, próximo da abertura 3. A sonda 3 foi fixada, internamente, no exaustor de cumeeira. Para todos os casos, as velocidades médias pontuais foram obtidas com as sondas posicionadas no centro das aberturas.

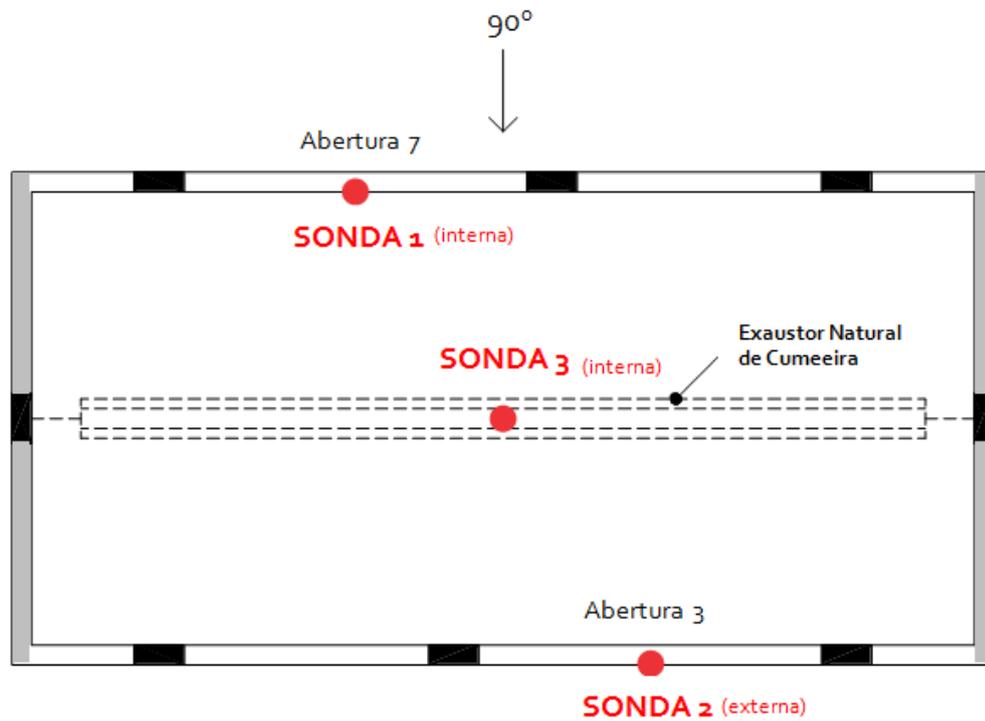


Figura 38 - Planta baixa do modelo – posicionamento das sondas.

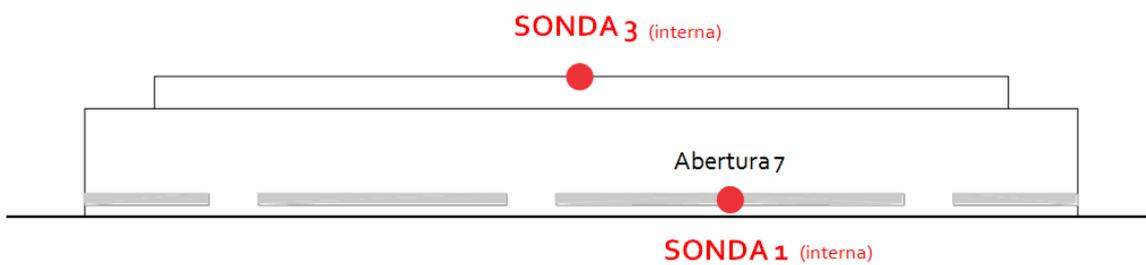


Figura 39 - Fachada do modelo a barlavento - posicionamento das sondas.

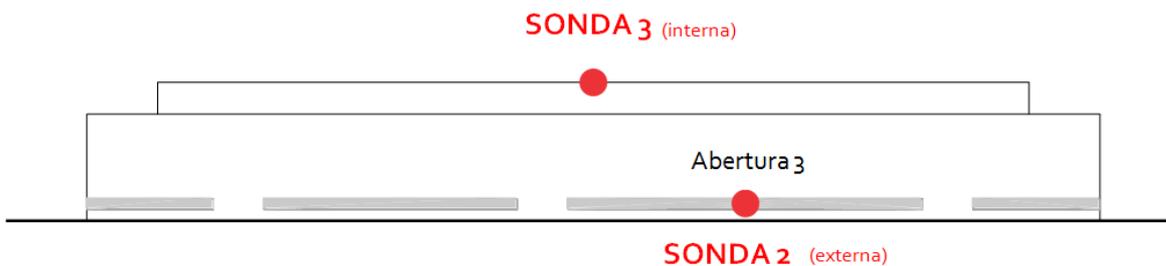


Figura 40 - Fachada do modelo a sotavento - posicionamento das sondas.

Segundo Nunes (2006), o anemômetro de fio quente é um instrumento de medição amplamente usado na investigação e análise de escoamentos de líquidos e gases. A técnica de anemometria à temperatura constante utiliza uma sonda de filamento de tungstênio de 5 μm de diâmetro e 1,25 mm de comprimento, com grande velocidade de resposta, alta sensibilidade e escassa interferência no escoamento. Esta sonda é conectada ao anemômetro propriamente dito, um circuito eletrônico que aquece a sonda a partir da passagem de uma corrente elétrica. Sob certas condições, a perda de calor instantânea do sensor provocada pelo escoamento é uma medida da velocidade instantânea do escoamento. A Figura 41 mostra em detalhe a composição de um anemômetro de fio quente. A sonda utilizada neste estudo é composta por apenas um filamento (1D) e mede a componente da velocidade no sentido perpendicular ao fio.

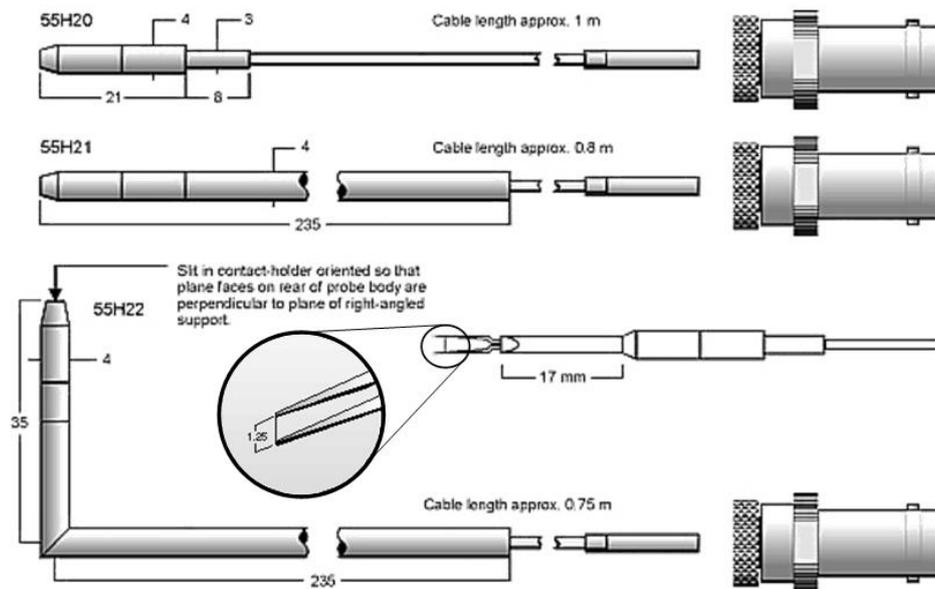


Figura 41 - Detalhes do anemômetro de fio quente e suportes para sua fixação.

Fonte: Dantec (www.dantecdynamics.com), acessado em 12.08.12.

O equipamento de controle das sondas de fio quente é mostrado na Figura 42 e serve de interface para converter o sinal de saída (analógico) para ser armazenado em um computador. O mesmo é capaz de controlar até três sondas simultaneamente em um mesmo ensaio.



Figura 42 - Sistema de controle das sondas de fio quente.

Para estes ensaios, foi simulado o vento com perfil de velocidades médias horárias segundo uma curva de potência de expoente $p = 0,23$, correspondentes às categorias de rugosidade superficial (tipo de terreno) III / IV da Norma NBR-6123 (ver capítulo 4.2), tendo sido utilizado duas velocidades médias de escoamento do vento no túnel.

Os ensaios foram realizados com o modelo fixado à mesa giratória M-II, do túnel de vento, para o ângulo de incidência do vento de 90° . A Figura 43 apresenta o modelo inserido no interior do túnel, sendo ensaiado com um vizinho a uma distância $0,5b$.



Figura 43 - Modelo instrumentado no interior do túnel.

O ensaio de anemometria de fio quente permitiu a aquisição de 2000 leituras de velocidades instantâneas por segundo, sendo o tempo total de ensaio 32 segundos. A Figura 44 apresenta estas velocidades, para os primeiros 16 segundos de ensaio.

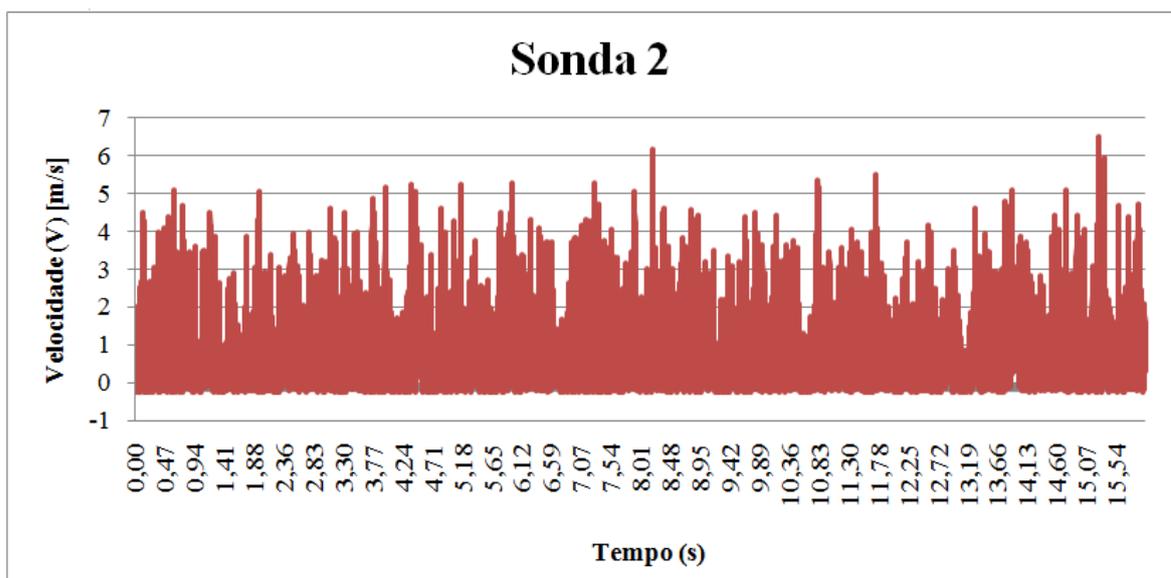


Figura 44 - Time series para a Sonda 2, *modelo isolado*.

As velocidades médias instantâneas para cada sonda, assim como os demais dados obtidos nos ensaios, são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados dos ensaios de medição direta de velocidades

0,5b					V _{anemômetro} (m/s)		
Tempo [s]	Temperatura [°C]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]	Pressão absoluta [kPa]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
32,00	27,00	20,55	201,53	100,85	4,912	1,273	2,036
1b					V _{anemômetro} (m/s)		
Tempo [s]	Temperatura [°C]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]	Pressão absoluta [kPa]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
32,00	26,70	20,48	200,84	100,85	7,058	1,343	2,665
2b					V _{anemômetro} (m/s)		
Tempo [s]	Temperatura [°C]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]	Pressão absoluta [kPa]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
32,00	26,80	20,58	201,82	100,84	8,787	1,343	3,318
4b					V _{anemômetro} (m/s)		
Tempo [s]	Temperatura [°C]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]	Pressão absoluta [kPa]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
32,00	26,50	20,61	202,12	100,83	10,219	1,200	3,891
isolado					V _{anemômetro} (m/s)		
Tempo [s]	Temperatura [°C]	Δp_a [mmH ₂ O]	Δp_a [Pa]	Pressão absoluta [kPa]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
32,00	27,10	20,56	201,62	100,86	10,459	1,121	3,867

Sonda 1 = Barlavento (A) ; Sonda 2 = Sotavento (B); Sonda 3 = Exaustor

A Tabela 20 mostra os valores calculados de massa específica do ar e velocidade de referência para os ensaios realizados. Os valores das velocidades adimensionais para as sondas 1 (barlavento), 2 (sotavento) e 3 (exaustor) foram calculados a partir das velocidades de referência, medidas no topo do modelo, e também são mostrados nesta tabela.

Tabela 20 – Velocidades adimensionais ($V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$) medidas para cada uma das sondas.

0,5b		$V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$		
ρ_{ar} [kg/m ³]	V_{ref} [m/s]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
1,16574	11,86253	0,414	0,107	0,172
1b		$V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$		
ρ_{ar} [kg/m ³]	V_{ref} [m/s]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
1,16691	11,83639	0,596	0,113	0,225
2b		$V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$		
ρ_{ar} [kg/m ³]	V_{ref} [m/s]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
1,16640	11,86782	0,740	0,113	0,280
4b		$V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$		
ρ_{ar} [kg/m ³]	V_{ref} [m/s]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
1,16746	11,87111	0,861	0,101	0,328
isolado		$V_{adm}=V_{sonda}/V_{ref}$		
ρ_{ar} [kg/m ³]	V_{ref} [m/s]	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
1,16547	11,86680	0,881	0,094	0,326

Sonda 1 = Barlavento (A); Sonda 2 = Sotavento (B); Sonda 3 = Exaustor

A Figura 45 mostra as velocidades adimensionais nas sondas 1, 2 e 3.

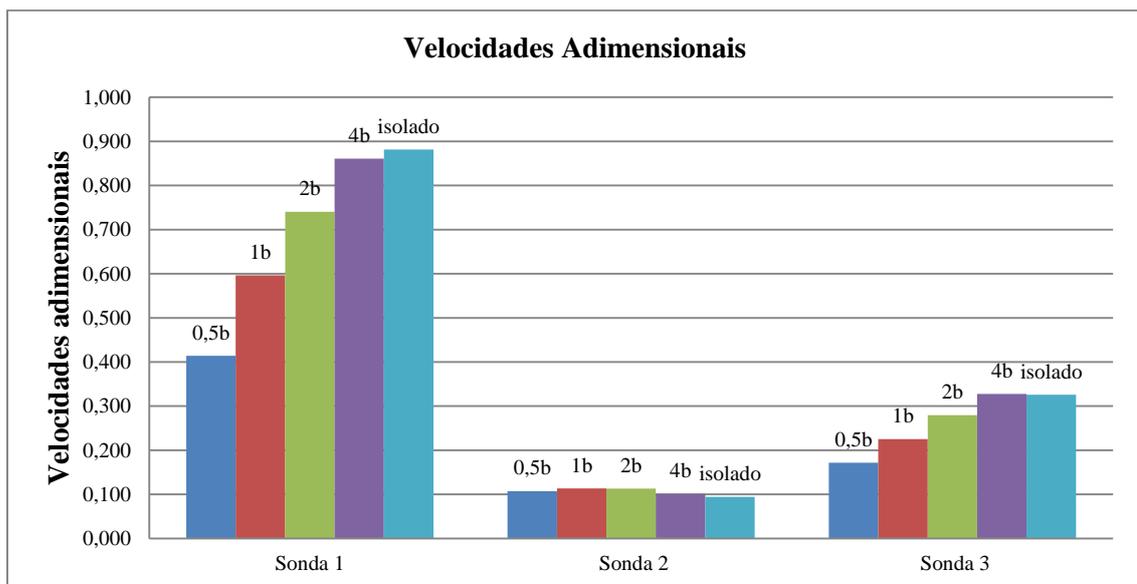


Figura 45 - Velocidades adimensionais para as sondas 1, 2 e 3

Percebe-se que, nos ensaios para a **fachada a barlavento (sonda 1)** e **para o exaustor natural de cumeeira (sonda 3)**, as velocidades diminuíram com a proximidade do modelo vizinho para todas as configurações de vizinhança. Já na **fachada a sotavento (sonda 2)**, localizada na esteira do modelo, as velocidades apresentaram uma pequena tendência de aumento de intensidade com a proximidade do modelo vizinho.

A determinação das vazões de ventilação a partir das velocidades médias, obtidas nos ensaios, é apresentada no Capítulo 5, assim como uma análise comparativa dos resultados obtidos através dos diversos métodos de cálculo.

5 CÁLCULO DAS VAZÕES DE VENTILAÇÃO E DO FATOR DE VIZINHANÇA

A determinação das vazões nas aberturas do pavilhão permite, em última análise, obter-se a eficiência da edificação quanto à sua ventilação natural pela ação do vento. Através dos ensaios, descritos no capítulo anterior, pode-se quantificar esta vazão e, posteriormente, comparar estes valores com os exigidos para a renovação de ar em função dos diversos usos possíveis em seu interior.

Através da Equação 19, calculou-se as vazões de ar (Q) para as fachadas a barlavento, sotavento e área do exaustor. Os valores obtidos a partir dos ensaios de pressões, para as 5 configurações de vizinhança, são apresentados na Tabela 21, assim como os obtidos a partir dos coeficientes de pressão externa sugeridos pela NBR 6123.

Tabela 21 – Vazões a partir dos ensaios de pressões para $V = 2$ m/s.

Abertura	Vazões Q [m ³ /s]					
	0,5b	1b	2b	4b	isolado	NBR 6123
Fachada A	115,3223	174,8300	204,4579	232,9100	235,3190	113,7110
Fachada B	-26,6281	-54,7562	-70,3864	-80,2948	-80,2381	22,5880
Exaustor	-88,6932	-120,0860	-134,0656	-152,6116	-155,1032	-138,1669
ΣQ	0,0010	-0,0122	0,0060	0,0035	-0,0224	-1,8678

Através da Equação 21, pode-se determinar as vazões de ar nas aberturas (Q) conhecendo-se o coeficiente de descarga da abertura (K), sua área (A) e a velocidade média do ar que passa pela mesma (V). Os valores das vazões, obtidos a partir dos ensaios de medição direta das velocidades, para as 3 sondas localizadas nas fachadas a barlavento (A), sotavento (B) e no exaustor de cumeeira (C), para as 5 configurações de vizinhança, são apresentados a seguir, na Tabela 22.

Tabela 22 – Vazões Q [m³/s] a partir dos ensaios de velocidades para $V = 2$ m/s.

	Vazões Q [m ³ /s]				
	0,5b	1b	2b	4b	isolado
Sonda 1	125,797	181,155	224,935	261,520	267,759
Sonda 2	32,602	34,470	34,379	30,710	28,699
Sonda 3	52,142	68,402	84,936	99,577	98,998

Os ensaios com anemômetros de fio quente medem apenas a velocidade do fluxo de ar que passa pela sonda e não o seu sentido. Como as velocidades foram medidas em apenas 3 das 9 aberturas do modelo, o somatório das vazões não é igual a zero, pois a velocidade medida pela sonda em uma determinada abertura pode não ser a mesma para as demais aberturas na mesma fachada. Além disso, as recirculações instantâneas causam alterações de sentido do escoamento do vento, alterando a todo o momento sua velocidade. Porém, o ensaio é válido na medida em que se podem quantificar vazões aproximadas, permitindo-se obter valores de vazão para a ventilação natural do pavilhão.

As Figuras 46 à 48 resumem as vazões calculadas para os dois tipos de ensaios e para todas as configurações de vizinhança, assim como as vazões obtidas através dos coeficientes fornecidos pela NBR 6123, apresentados por face (barlavento, sotavento e exaustor).

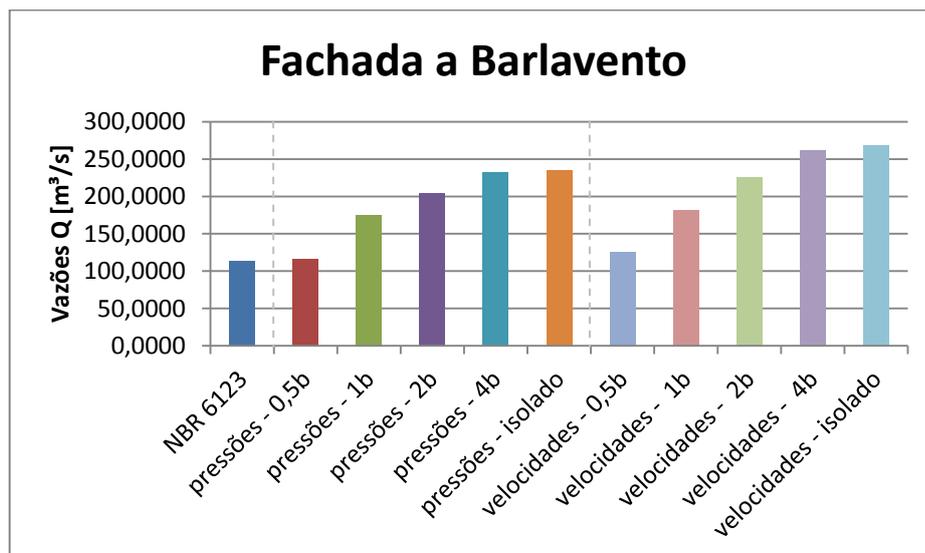


Figura 46 - Vazões obtidas para a fachada a barlavento.

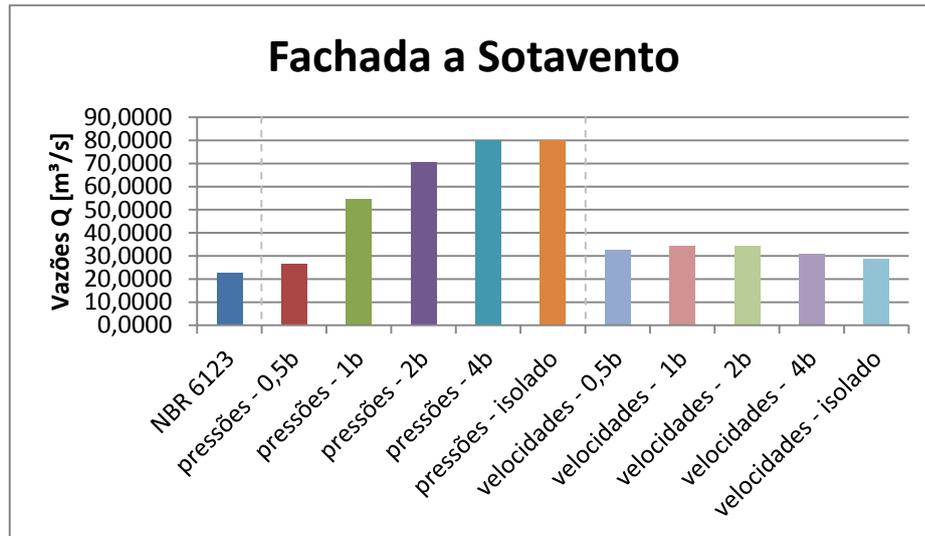


Figura 47 - Vazões obtidas para a fachada a sotavento.

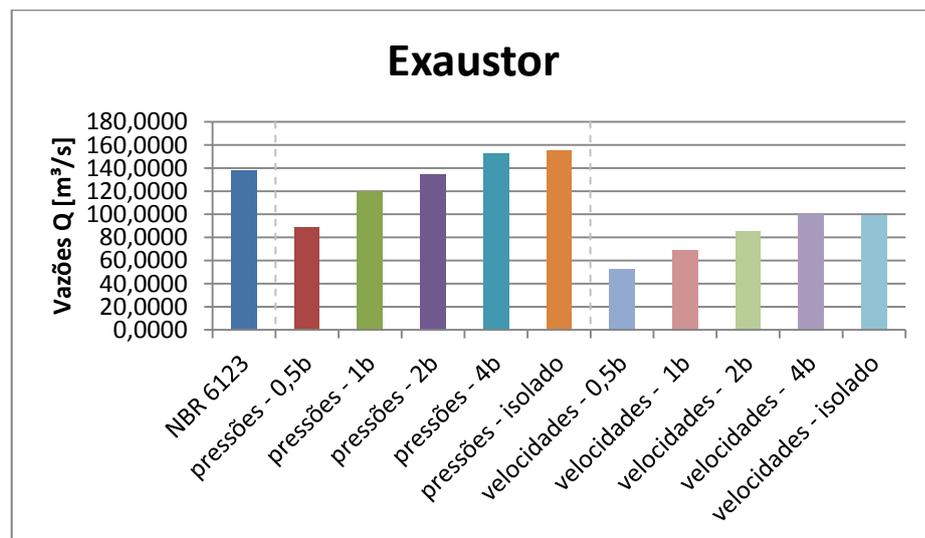


Figura 48 - Vazões obtidas para o exaustor natural de cumeeira.

A fachada a barlavento apresentou vazões crescentes, em suas aberturas, conforme aumentava a distância entre o modelo e o vizinho, salientando-se o valor obtido a $0,5b$, muito próximo do obtido através da NBR 6123. Com pressões positivas do vento atuando nesta fachada, suas aberturas são as responsáveis pela entrada de ar no pavilhão.

O gráfico para a fachada a sotavento mostra comportamentos diferentes nos dois tipos de ensaios. No ensaio de pressões foram obtidos valores crescentes para as vazões conforme aumentava a distância entre o modelo e o vizinho. No ensaio de velocidades houve pouca variação para os valores de vazão.

Os valores obtidos para Q nos ensaios de pressão alcançaram magnitudes superiores àqueles obtidos nos ensaios de velocidades e próximos do indicado pela Norma.

Em ambos os ensaios, pode-se perceber o importante papel do exaustor de cumeeira na ventilação da edificação. Apresentando vazões de aproximadamente o dobro das vazões da fachada a sotavento, o exaustor foi o responsável pela retirada da maior parte do ar do pavilhão (exaustão), com variações semelhantes a da fachada a barlavento para as diversas configurações de vizinhança.

Apesar dos valores para as vazões de ventilação apresentarem variações consideráveis, para o caso de uma comparação entre os dois tipos de ensaio, foi possível também efetuar uma análise comparativa do comportamento do vento entre as configurações de um mesmo ensaio, relação expressa pelo Fator de Vizinhança, que correlaciona, através da Equação 5, os resultados para o modelo com vizinho (em suas diversas distâncias) com o modelo isolado. A Tabela 23 mostra os resultados para este Fator para ambos os ensaios.

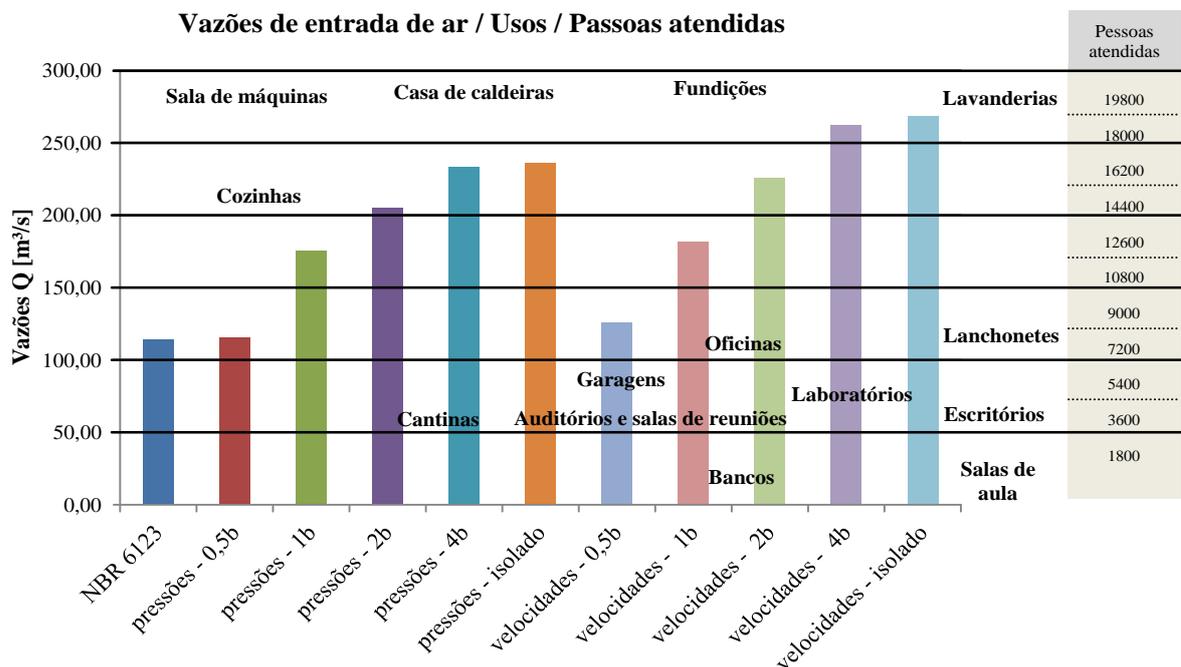
Tabela 23 – Cálculo do Fator de Vizinhança a partir das vazões obtidas nos ensaios.

Configuração	Vazões (m ³ /s)		Fator de Vizinhança		Variação (%)
	Pressões	Velocidades	Pressões	Velocidades	
0,5b	115,32	125,80	0,49	0,47	4,25
1b	174,83	181,15	0,74	0,68	8,82
2b	204,46	224,94	0,87	0,84	3,57
4b	232,91	261,52	0,99	0,98	1,02
isolado	235,32	267,76	1,00	1,00	0,00

Os dados da Tabela 23 apresentam proximidade de valores para FV para as respectivas configurações de vizinhança nos dois ensaios. Para a configuração 0,5b, as vazões calculadas são reduzidas em mais de 50% em relação ao modelo isolado, possuindo uma variação de 4,25% entre os FV. Na configuração 1b, percebe-se a maior variação entre os ensaios (8,82%), reduzindo-se consideravelmente esta variação para as demais configurações. A proximidade dos valores das vazões para as configurações 4b e isolado (que simula a distância 10b), permite ponderar-se que a distância em que o vizinho não causa interferência no escoamento do vento está muito próxima de 4b, devendo-se realizar ensaios com configurações de distância de vizinhança entre 4b e 10b a fim de se precisar esta dimensão.

A Figura 49 sintetiza a pesquisa, buscando demonstrar os resultados para as vazões de entrada de ar (fachada a barlavento) de todos os ensaios e o obtido por Norma, correlacionando-os com valores estimados para os diversos usos possíveis para a edificação, apresentados nas Tabelas 1 e 2 deste estudo.

Estimou-se, também, a quantidade de pessoas que poderiam ser atendidas através destas vazões de ventilação, fator importante em pavilhões industriais com grande número de trabalhadores.



Nota: vazão por pessoa considerada: 50m³/h.

Figura 49 - Vazões de entrada de ar x Usos x Pessoa atendidas.

Percebe-se que o modelo, para a distância *0,5b*, ficou com sua ventilação prejudicada justamente pela proximidade do vizinho e, conseqüente, interferência no escoamento do vento. Alguns usos, como o de oficinas e lanchonetes, poderiam ser inviabilizados se uma edificação vizinha ao pavilhão fosse construída em suas proximidades (*0,5b*).

Usos que exijam maior renovação do ar, como o de cozinhas, só é viabilizado para configurações de vizinhança acima de *4b* segundo ensaio de pressões, e *2b* segundo o ensaio de velocidades.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

A interferência da vizinhança é demonstrada, através deste estudo, como um fator determinante tanto para a ventilação natural pela ação do vento, quanto para os possíveis usos que a edificação pode abrigar em função da eficiência de seu sistema de renovação de ar. Fator externo ao projeto de uma edificação e em constante mudança, a presença de edificações vizinhas no entorno pode, em muitos casos, inviabilizar certas atividades no local. Diante deste importante fato, buscou-se definir algumas distâncias para a vizinhança que simulassem as diversas condições de escoamento do vento, as respectivas vazões nas aberturas e a eficiência da ventilação natural para cada caso. A partir dos ensaios, pode-se perceber que a proximidade do vizinho gera desempenhos diversos na vazão das aberturas, e variam conforme a orientação da fachada em relação ao ângulo de incidência do vento, estabelecido como 90° em relação à sua fachada de maior dimensão para todos os ensaios. A **fachada a barlavento**, cujas aberturas foram responsáveis pela entrada de ar no pavilhão, apresentou vazões que diminuía com uma maior proximidade do vizinho. Na **fachada a sotavento**, localizada na região da esteira do modelo, as vazões não apresentaram alterações consideráveis para as diferentes configurações de ensaio, indicando que a presença da vizinhança, para o ângulo de incidência estudado, não interfere diretamente no escoamento do vento nesta fachada. O **exaustor natural de cumeeira**, localizado na cobertura e mergulhado em uma zona permanente de sucções, apresentou os maiores valores negativos para as pressões, possibilitando uma eficiente remoção do ar interno ao pavilhão. As vazões no exaustor diminuía com a proximidade da vizinhança, tendo relação direta com o desempenho das aberturas na fachada a barlavento, já que há constância nos valores obtidos na fachada a sotavento. O exaustor de cumeeira é o maior responsável pela retirada do ar interno ao pavilhão, sendo elemento imprescindível em um sistema de ventilação natural. O ensaio de medição direta das velocidades se mostrou uma ferramenta importante na obtenção das vazões de ventilação do conjunto de aberturas do pavilhão industrial, já que os ensaios com modelos que representam as aberturas reais permitem uma análise mais precisa do comportamento do escoamento do vento. Apesar dos valores para as vazões de ventilação apresentarem variações consideráveis, para o caso de uma comparação entre os dois tipos de ensaio, foi possível efetuar uma análise mais precisa do comportamento do vento entre as configurações de um mesmo ensaio, sendo expresso pelo Fator de Vizinhança, que relaciona os resultados para o modelo com vizinho (em suas diversas distâncias) com o modelo isolado.

Os resultados obtidos nestes ensaios se aproximam dos valores sugeridos pela NBR 6123, que trata o tema da ventilação de forma simplificada, não contemplando o caso do exaustor de cumeeira.

Quanto ao regime de escoamento do vento, pode-se classificar as diferentes configurações de distância de vizinhança por seu nível de interferência. Para a configuração *0,5b*, o vento caracterizou-se por um regime de escoamento deslizante, devido à grande proteção e a provável formação de um vórtice estável no espaço entre os modelos, fazendo o vento deslizar sobre o topo dos mesmos. As configurações *1b* e *2b* podem ser enquadrados em um regime de escoamento de interferência de esteira, pois a distância não é suficiente para a formação completa da esteira e tampouco próxima o suficiente para a formação de um vórtice estável. Por fim, nas configurações *4b* e *isolado*, o modelo vizinho oferece pouca ou nenhuma interferência no modelo ensaiado, estando afastados de forma que cada um atua isoladamente, definindo um regime de escoamento de corpo isolado.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros, pode-se citar o seguinte:

- Efetuar os mesmo ensaios com outros ângulos de incidência do vento, a fim de se aprofundar o conhecimento sobre o comportamento do vento quando há a interferência de edificações vizinhas;
- Realizar ensaios de interferência de vizinhança para configurações entre *4b* e *isolado* (*10b*), a fim de se definir com maior precisão a que distância esta interferência torna-se inexistente;
- Ensaiar outras geometrias de edificação e de vizinho;
- Realizar ensaios com um maior número de modelos vizinhos;
- Analisar o efeito da vizinhança nos demais coeficientes (Fator de Vizinhança);
- Realizar os ensaios de medição de velocidades, mantendo abertas apenas as aberturas instrumentadas com os anemômetros de fio quente, visando a obtenção de valores mais precisos para as vazões.

7 REFERÊNCIAS

- ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. **Handbook Fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 4th edition, 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 88p. 1988.
- AYNLEY, R. M., MELBOURNE, W. and VICKERY, B. J. **Architectural Aerodynamic**. Applied Science Publishers Ltd., London. 254 pp. p. 210. 1977.
- AYNLEY, R. M. **Wind-generated Natural Ventilation of Housing for Thermal Comfort in Hot Humid Climates**. Proceedings of the Fifth International Conference. Fort Collins, Colorado, USA. Wind Engineering, Vol .1. Pergamon Press. Pp. 243-254. 1979.
- BAILEY, A.; VINCENT, N. D. G. **Wind-Pressure of Buildings Including Effects of Adjacent Buildings**. Journal of The Institution of Civil Engineers (London) 20 (8): 243-275, 1943.
- BATURIN, V. V. **Fundamentos de Ventilación Industrial**. Barcelona: Editorial Labor, 1976.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 2^a. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1990.
- BLESSMANN, J. **Pressão interna**. 3^a. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1991.
- BLESSMANN, J. **The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10. pp. 231-248, 1982.
- BLESSMANN, J.; RIERA, J. D. **Interaction effects on neighbouring tall buildings**, in Proc. 5th International Conference Wind Engineering Fort Collins. CO, 1979, pp381-395.
- BROCKETT, B. L. and ALBRIGTH, L. D. **Natural Ventilation in Single Airspace Building**. J. Agric. Eng. Res. 37. pp. 141-154. 1987.
- BRUCE, J. M. **Wind Tunnel Study: Suckler Cow Building**. **Farm Building Progress**, October, pp. 15-17, 1974.
- BRUCE, J. M. **A computer program for the calculation of natural ventilation due to wind**. **Farm Building**, R&D studies. Nov., (57-8), 7 pp. 1975.
- BRUCE, J. M. **Natural Ventilation, Its Role and Applications in the Bio-climatic System**. **Farm Building**, R&D studies. Feb., pp. (1-8), 1977.

CHIU, Y. H. and ETHERIDGE, D. W. **External Flow Effects on the Discharge Coefficients of Two Types of Ventilation Opening.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, March 2004, Pages 291-313.

CHIARELLO, Juliana Ana. **Verificação Experimental do Efeito Chaminé em Pavilhões Industriais.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza.*

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

COOK. N. J.. **The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures.** (Building Research Establishment). London, UK. 1990.

DAVENPORT, A. G. AND ISYUMOV, N. **The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading.** In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1 pp. 201-230, 1967.

FROTA, A. B. **Ventilação de Edifícios Industriais: Modelo Paramétrico para Dimensionamento de Sistemas de Ventilação Natural por Efeito Chaminé.** 1989. Tese (Pós-Graduação Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

HARRIS. C. L. **Influence of neighbouring structures on the wind pressure on tall buildings.** Bureau of Standards. J. Res. 1934, 12 (Research Paper RP 637) 103-118.

HUSSAIN M., LEE B. E. **A Wind Tunnel Study of the Mean Pressure Forces Acting on Large Groups of Low-rise Building.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 6, p. 207-225, October, 1980.

GIVONI, B. **Climate and Architecture.** London, Elsevier, 1976.

IRMINGER, J. O. V., NORCKENTVED. **Wind-Pressure of Buildings.** Copenahgue, 1936.

KHANDURI, A. C.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C. **Wind-induced interference effects on buildings - a review of the state-of-the-art.** Engineering Structures, Vol. 20, No, 7, pp, 617-630, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1998.

LOREDO-SOUZA, A.M.; ROCHA, M. M.; GRAZIANO, F.; NÚÑEZ, G.J.Z., CARPEGGIANI, E. A. **Ação do Vento sobre o Empreendimento SP-Wellness.** V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. 2003.

LOREDO-SOUZA A. M. **Influence of Opening Type Mean Internal Pressure in Low Buildings**. In: Proceeding of the Ninth International Conference on Wind Engineering. New Delhi, India. Vol. III, pp 1151-1161, 1995.

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

MELBOURNE, W. H.; SHARP, D. B. **Effect of upwind buildings on the response of tall buildings**. in Proc. Regional Conf. Tall Buildings, Hong Kong, 1976, pp 174-191.

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

NUNES, Daniel Alexandre. **Estudo da Ventilação Natural por Efeito do Vento em Pavilhões Industriais Utilizando Modelos Reduzidos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. *Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza*.

RUSCHEWEYH, H. P. Dynamic response of high-rise buildings under wind action with interference effects from surrounding buildings of similar size. in Proc. 5th International Conference Wind Engineering Fort Collins. CO, 1979, pp 725-734.

SILVANI, Marinês. **Subsídios para o Projeto da Ventilação Natural em Pavilhões Industriais**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Passo Fundo. *Orientador: Mario José Paluch*.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **Minimum Design Loads on Structures (SAA Loading Code). Part 2: Wind Loads**, AS 1170.2, North Sydney, Australia. 1989.

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

VAN STRAATEN, J. F. **Thermal Performance of Building**. Amsterdam, Elsevier, 1967.