

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VENTILAÇÃO NATURAL INDUZIDA PELA AÇÃO COMBINADA DO VENTO E DA TEMPERATURA EM EDIFICAÇÕES

AUTOR: LUCIANO SOUZA RODRIGUES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação do
Departamento de Engenharia Civil
da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto, como parte
integrante dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Ciências da Engenharia Civil, área
de concentração: Construção
Metálica.

Ouro Preto, dezembro de 2008.

R696v

Rodrigues, Luciano Souza.

Ventilação natural induzida pela ação combinada do vento e da temperatura em edificações [manuscrito] / Luciano Souza Rodrigues - 2008.

xv, 71f.: il., color.; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Metálica.

1. Edifícios - Ventilação - Teses. 2. Conforto térmico - Teses. 3. Soluções numéricas - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto.

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**VENTILAÇÃO NATURAL INDUZIDA PELA AÇÃO COMBINADA DO
VENTO E DA TEMPERATURA EM EDIFICAÇÕES**

AUTOR: LUCIANO SOUZA RODRIGUES

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 12 de dezembro de 2008, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Henor Artur de Souza (Orientador / UFOP)

Prof. Dr. Gilmar Guimarães (UFU)

Prof. Dr. Geraldo Donizetti de Paula (UFOP)

**“O temor do Senhor é o princípio do saber,
mas os loucos desprezam a sabedoria e o ensino” Pv. 1.7**

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Danielle, que sempre me apoiou em tudo. Obrigado pelo apoio, carinho, diálogo e compreensão em mais essa fase da vida.

Aos meus pais, José Rodrigues e Arlete, que sempre acreditaram no meu potencial. Obrigado pelo amor, companheirismo, paciência e por dividir comigo os momentos de alegria e de tristeza.

Ao meu Orientador, Professor Dr. Henor Artur de Souza, pela orientação, assistência, ensinamentos, paciência e confiança.

A todos os professores do PROPEC, em especial ao professor Dr. Geraldo Donizetti de Paula que participou da banca examinadora.

Ao professor Dr. Gilmar Guimarães da Universidade Federal de Uberlândia pela participação na banca examinadora.

À Professora Rita de Cássia e ao professor José Luiz Rangel da Universidade Federal de Viçosa pelo incentivo ao ingresso na carreira acadêmica.

Aos colegas da pós-graduação Eliana Nunes, Carmem Lage, Francisco Canazart, Élen Ataíde, Mariana Felicetti, William Fernandes, Rafael Aquino, Márcio Sequeira, Alexandre Kokke, Carol Albuquerque e Marcelo Piza.

A todos os colegas da República Ox em especial ao Francisco, Gilcimar, Bruno, Fábio, Joel, José Maria e Flávio.

Ao amigo Jairo pela preciosa ajuda na conclusão deste trabalho.

Às minhas irmãs Sirlene e Rosilene pelo incentivo.

A Róvia, pela gentileza e atenção de sempre.

A Capes pelo apoio financeiro.

RESUMO

A Ventilação Natural é o emprego do fluxo normal do ar com o propósito de se obter um bom condicionamento térmico do ambiente, proporcionando condições favoráveis de conforto aos ocupantes, além da melhoria da qualidade do ar interno. A diferença de pressões exercidas pelo ar sobre um edifício pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar interno e externo, ou por ambas as forças agindo simultaneamente. A força dos ventos promove a movimentação do ar através do ambiente, produzindo a ventilação denominada ação dos ventos e o efeito da diferença de densidade do ar, função da diferença de temperatura, provoca o chamado efeito chaminé. Quando utilizada como estratégia arquitetônica e bioclimática, a ventilação natural pode proporcionar projetos mais espaçosos e iluminados, o que pode reduzir significativamente o custo energético da edificação. Neste trabalho faz-se um estudo numérico da ventilação natural em ambientes construídos utilizando o método dos elementos finitos, por meio do software ANSYS. O modelo numérico é utilizado na determinação dos efeitos das forças do vento e das forças térmicas combinadas, obtendo-se o fluxo de ar e a distribuição de temperatura dentro do ambiente. Analisa-se a influência das fontes internas de calor do ambiente na eficiência da ventilação unilateral e cruzada. Os resultados obtidos são comparados com os resultados de modelos empíricos. Observa-se que o aumento da fonte interna de calor influencia diretamente a circulação do ar interno e que a eficiência da ventilação cruzada é de 3.5 vezes maior do que a ventilação unilateral, aumentando os vórtices no interior do ambiente.

ABSTRACT

The natural ventilation is the use of the normal airflow with the aim of getting a good conditioning thermal environment, providing favorable conditions of comfort to the occupants, in addition to improving indoor air quality. The pressure differences exerted by the air on a building can be caused by the wind or by the density difference of internal and external air, or by both forces acting simultaneously. The force of the winds promotes the movement of air through the environment, producing the ventilation called winds action and the effect of the density difference of the air, a function of the temperature difference. Moreover, this force also causes the so-called thermal buoyancy effect. When used as an architectural and bioclimatic strategy, the natural ventilation can provide more spacious and illuminated designs, which can significantly reduce the building's energy cost of energy. In this work, we made a numeric study of the natural ventilation in built environments using the method of the finite elements with the software ANSYS. The numeric model is used to determine the effects of the force of the winds and the combined thermal forces, resulting in the airflow and the distribution of temperature inside the environment. We analyzed how the internal heat sources of the environment influenced the single sided and cross ventilation efficiency. The results obtained are compared with the results of empiric models. We observed that the increase of the internal heat source directly influences the circulation of the internal air. In addition, we noticed that the efficiency of cross ventilation is 3.5 times higher than the single sided ventilation, increasing the vortexes inside the environment.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE QUADROS E TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo Geral	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
1.2. Justificativa	4
1.3. Metodologia	5
1.4. Estrutura do Trabalho	5
CAPÍTULO 2 - VENTILAÇÃO NATURAL	7
2.1. Tipos de Ventilação Natural	10
2.1.1. Ventilação por ação dos ventos	11
2.1.2. Ventilação por efeito chaminé	13
2.1.3. Ventilação Cruzada	14
2.1.4. Ventilação Unilateral	17
2.2. A Importância da Ventilação	17
2.3. Ventilação Natural como Estratégia Bioclimática	20
2.4. Métodos de Cálculo da Ventilação	23
2.4.1. Métodos Empíricos para cálculo da vazão de ar	26
2.4.1.1. Ventilação Cruzada	26
2.4.1.2. Ventilação Unilateral	29

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA ADOTADA	32
3.1. Simulação Numérica.....	32
3.2. Modelo Analítico	33
3.3. Programa Computacional	35
3.4. Modelo Físico-Numérico	37
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....	41
4.1. Ventilação Unilateral	46
4.2. Ventilação Cruzada.....	52
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
5.1. Conclusões	60
REFERÊNCIAS	62
ANEXO A - MODELOS EMPÍRICOS PARA O FLUXO DE AR.....	67
A.1. Método da ASHRAE	67
A.2. Método de Aynsley	68
A.3. Método de De Gidds and Phaff.....	69
A.4. Método de Givoni	69
A.5. Método CSTB	70

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Efeito de uma árvore sobre a direção do vento, com relação à sua distância do edifício</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.2 - Estratégias de ventilação natural para uma mesma ventilação</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3 - Esquemas de corrente de ar ao redor da edificação – planta e corte</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.4 - Ventilação por Efeito Chaminé das salas de aula do Pavilhão de Aulas II da Universidade Federal de Viçosa.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.5 - Ventilação cruzada numa edificação de um só pavimento</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.6 - Esquemas de ventilação com e sem corrente cruzada</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.7 - Incidência do ar e sua distribuição interna</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.8 - Efeito do fluxo de ar em aberturas adjacentes.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.9 – Ventilação unilateral numa edificação de um só pavimento.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.10 - Posição das aberturas verticais e horizontais em relação ao efeito do fluxo interno de ar das edificações</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.11 - Distribuições de pressão resultante da ação do vento.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.12 - Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.13 - Ventilação cruzada devida ação da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.14 – Ventilação cruzada devida ação combinada dos ventos e da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.15 – Ventilação unilateral devida à ação dos ventos em uma única abertura.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.16 – Ventilação unilateral devida ação da diferença de temperatura em uma única abertura.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.17 - Ventilação unilateral devida à ação da temperatura em duas aberturas.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.1 - Princípios que regem o escoamento.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.2 - Discretização do Elemento.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.3 - Elemento FLUID141</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.4 - Geometria FLUID142</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.5 - Geometria da edificação</i>	<i>38</i>

<i>Figura 3.6 - Discretização do Modelo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.7 - Vista lateral da malha de elementos</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.1 - Carga de calor total dentro do espaço (q).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.2 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor - ventilação unilateral.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.3 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor - ventilação cruzada.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.4 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor-ventilação cruzada e unilateral.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.5 - Plano onde serão feitas as análises das simulações</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.6 - Plano longitudinal.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.7 - Disposição das aberturas de entrada e saída da ventilação unilateral.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.8 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 200 W.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.9 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 400 W.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.10 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 600 W.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.11 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 800 W.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.12 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 1000 W.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.13 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 200 W.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.14 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 400 W.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.15 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 600 W.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.16 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 800 W.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.17 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 1000 W.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.18 – Disposição das aberturas de entrada e saída da ventilação cruzada.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.19 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 200 W.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.20 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 400 W.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.21 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 600 W.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.22 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 800 W.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.23 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 1000 W.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.24 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 200 W.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.25 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 400 W.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.26 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 600 W.....</i>	<i>57</i>

<i>Figura 4.27 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 800 W.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.28 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 1000 W.....</i>	<i>58</i>

LISTA DE QUADROS E TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Coeficientes para determinação da velocidade média do vento.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela A.1 - Coeficientes b para várias alturas de edificação e classes de proteção local.....</i>	<i>68</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 2

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

$A_{entrada}$ - área de entrada da ventilação

$A_{saída}$ - área de saída da ventilação por ação da temperatura

A_b - área equivalente das aberturas

A_w - área equivalente das aberturas por ação dos ventos

C_d - coeficiente de descarga referente à perda de carga

C_p - coeficiente de pressão

C_{p1} - coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar

C_{p2} - coeficiente de pressão da abertura de saída de ar

H - altura entre duas aberturas verticais

N - taxa de renovação de ar por hora ou número de trocas de ar por hora

T_e - temperatura externa

T_i - temperatura interna

\bar{T} - temperatura média

Q_e - vazão de ar externa necessária

Q_b - vazão de ar pela ação da temperatura

Q_w - vazão de ar pela ação dos ventos

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

a - coeficiente que depende da localização

g - aceleração da gravidade

k - coeficiente que depende da localização

p - pressão instantânea média

p_0 - pressão de referência para o vento livre

v_z - velocidade do vento na altura de referência z

v_{10} - velocidade do vento a 10 m de altura em campo aberto

z - altura da cumeeira para edificações de até dois andares

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

ΔC_p - variação dos coeficientes de pressão

ΔT - variação de temperatura

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

ρ - densidade do ar

ρ_e - massa específica do ar externo

CAPÍTULO 3

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

c_p - calor específico

g_i - aceleração da gravidade

p - pressão no fluído

t - tempo

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

T - temperatura

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

α - difusidade térmica ($\alpha = k / \rho c_p$)

μ - viscosidade do fluido

τ_{ij} - tensões de cisalhamento

ρ - massa específica do fluido

ρu - taxa de fluxo de massa que entra no volume de controle na direção de x

ρv - taxa de fluxo de massa que entra no volume de controle na direção de y

ρw - taxa de fluxo de massa que entra no volume de controle na direção de z

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerado ocorrido a partir da Revolução Industrial tem contribuído para o desenvolvimento de complexas relações para o convívio humano. Além das interações sociais, as atividades, cada vez mais centradas em áreas metropolitanas têm causado grandes impactos no meio ambiente, dentro dos quais estão a contaminação e formação de um clima urbano específico, que, como conseqüências, provocam perdas na qualidade de vida dos habitantes das cidades e aumentam a necessidade energética para o condicionamento térmico de edificações.

No campo da construção civil, a preocupação do homem com o seu bem-estar e conforto, por exemplo, é um reflexo desse quadro. Paralelamente à introdução de novas tecnologias construtivas, há a preocupação com relação ao conforto térmico do ambiente construído. Desse modo, é imperativo que se tenha uma adequação climática das edificações, lançando-se mão de projetos e materiais que resultem em edificações mais confortáveis.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000), atualmente mais de 80% da população brasileira habita em áreas urbanas. Esta aglomeração provoca alteração nas condições climáticas em relação às áreas circunvizinhas e ao clima da região onde se encontram estas cidades. A geração de microclimas tem efeito direto no planejamento de novas edificações, visto que as condições climáticas resultantes da interação da sociedade e natureza são fatores determinantes das condições de conforto, bem como para o uso racional da energia contribuindo para um desenvolvimento humano sustentável.

De acordo com a norma ISO 7730: 2006 o conforto de uma pessoa pode ser definido como um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente que a

envolve, sendo, portanto, uma característica subjetiva por envolver aspectos biológicos como seu metabolismo, físicos como vestuário e psicológicos. Em relação às condições ambientais, para definição de um conforto térmico, são considerados alguns elementos climáticos como a umidade, temperatura e movimentação do ar, bem como os fatores relativos ao recebimento ou emissão de radiação solar. A interação entre os fatores ambientais e humanos é de grande relevância para a determinação de um sistema apropriado de condicionamento térmico para as edificações, o qual pode ocorrer de forma natural, induzida ou uma mescla destes.

O emprego do fluxo normal do ar com o propósito de se obter um bom condicionamento térmico do ambiente proporcionando condições favoráveis de conforto aos ocupantes, além da melhoria da qualidade do ar interno é o que se define como ventilação natural. Uma circulação natural de ar adequada dentro de um ambiente construído, além de auxiliar na diminuição do gradiente térmico contribui para a renovação do ar interno que, dependendo do perfil de ocupação do ambiente, pode ser prejudicial à saúde.

Sendo assim, a ventilação natural tem a finalidade de evitar a dispersão de contaminantes no ambiente, bem como diluir concentrações de gases, vapores, odores e promover conforto térmico ao homem. Logo, a melhoria do deslocamento de ar numa edificação se justifica à medida que a qualidade do ar interno pode afetar a produtividade das pessoas que a ocupam, além de causar doenças. Como exemplo para este tipo de estratégia de condicionamento térmico, cita-se a abertura de portas, janelas, bem como a abertura de clarabóias e áticos ventilados. Sua eficiência numa edificação está associada ao número, posição, tipo e tamanho das aberturas existentes para a passagem de ar e também à ação combinada das forças do vento e das diferenças de temperatura.

Por outro lado, quando a ventilação é induzida por equipamentos mecânicos, é denominada ventilação mecânica. Este sistema é baseado em componentes mecânicos (compressores, bombas, sopradores) que consomem energia elétrica e embora sejam satisfatórios, sua construção e operação têm um preço elevado. Nesse contexto, a ventilação natural aparece como um modo alternativo e eficaz de ventilação, pelo seu

reduzido custo e economia de energia. O desperdício de energia no país é muito elevado e as edificações consomem 42% da energia disponível. Além disso, o potencial de conservação de energia das edificações existentes pode chegar a 30% e com a utilização de estratégias de condicionamento como a ventilação natural em novas edificações esse potencial pode chegar a 50% (LETAN *et al.*, 2002; LAMBERTS *et al.*, 1997).

O conhecimento científico do fenômeno da ventilação natural dos edifícios é relativamente pequeno comparado com o que atualmente existe sobre ventilação com o emprego dos equipamentos mecânicos. A construção civil do século XX se caracterizou pela exagerada importância dada à tecnologia. Em função disto, há hoje uma dependência em relação ao controle mecânico do ambiente interior, em detrimento da exploração dos fenômenos climáticos naturais para satisfação das exigências humanas de conforto.

Como decorrência da falta de instrumentos de cálculos simplificados e mesmo da atitude dos projetistas ao encarar o problema da ventilação natural, encontram-se com frequência edifícios dotados de instalações de ventilação mecânica projetadas dentro das técnicas mais rigorosas sobre o assunto. E, em edifícios que dispõem apenas da ventilação natural, constata-se que nenhuma utilização dos conhecimentos já existentes sobre o assunto foi feita (HERNANDES *et al.*, 1998, TOLEDO, 1999).

Deste modo, um aprofundamento teórico em relação aos fatores envolvidos com as estratégias de ventilação natural se faz necessário, visto que, a constante utilização de recursos mecânicos para obtenção de conforto térmico é um dos fatores que contribui para a geração do desconforto, pois estes equipamentos solucionam os problemas imediatos, mas não auxiliam na obtenção do desenvolvimento sustentável, cujos princípios baseiam-se no alcance do bem-estar da sociedade por meio de ações que reduzam o impacto ambiental. Além disso, verifica-se, principalmente nos países europeus, uma crescente preocupação com as questões ambientais as quais se relacionam não apenas com as sensações internas das edificações, mas também com as que envolvem as gerações futuras.

Neste trabalho estuda-se a ventilação natural avaliando a influência da fonte de calor no ambiente interno, considerando as configurações de ventilação cruzada e ventilação unilateral. Este estudo é realizado por meio de uma abordagem numérica tridimensional para avaliação do fluxo de ar e da distribuição de temperatura para um ambiente típico de escritório.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar a ventilação natural, unilateral e cruzada, dirigida pela ação combinada das forças do vento e térmicas, num ambiente construído, avaliando-se a influência das fontes internas de calor.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica sobre ventilação natural em edificações;
- Estudo da ventilação natural em edificações;
- Definição das condições de contorno relevantes;
- Definição das configurações de ambientes para a avaliação;
- Modelagem matemática para o fluxo de ar dentro dos ambientes;
- Simulação numérica da ventilação unilateral e cruzada nos ambientes pré-definidos;
- Análise dos resultados obtidos.

1.2. Justificativa

O conteúdo proposto aborda uma questão atual que é o bem estar do homem em relação ao conforto térmico e a qualidade do ar, dois aspectos intrinsecamente ligados à ventilação. A ventilação natural é um dos recursos mais importantes para garantir que as condições de conforto ambiental sejam satisfeitas, além de contribuir significativamente para a eficiência energética das edificações.

Alem disso, a ventilação mecânica e o uso do ar condicionado em edificações consomem uma grande quantidade de energia em todo o mundo, especialmente em países desenvolvidos, onde as edificações são responsáveis por 1/3 da energia consumida. No Brasil, o uso do ar condicionado e a iluminação são responsáveis por 48 % do consumo de energia elétrica no setor de edifícios comerciais e públicos, segundo o Programa de Combate ao desperdício de Energia elétrica (PROCEL, 2006).

Assim, é necessário que haja uma integração entre um ambiente interno confortável com um consumo mínimo de energia. Neste caso, a ventilação natural é uma alternativa eficiente para a redução do consumo de energia em edificações, proporcionando conforto térmico e mantendo o ambiente interno saudável.

1.3. Metodologia

Para o estudo da ventilação natural em edificações divide-se a metodologia adotada em duas etapas sequenciais: uma primeira, de abordagem analítica e uma segunda, de abordagem numérica.

Uma modelagem matemática para fluxo de ar e de temperatura na edificação, com as condições de contorno previamente estabelecidas é determinada. Neste modelo são identificadas as variáveis mais relevantes no estudo da ventilação na edificação, em função das configurações dos ambientes e o perfil de ocupação.

Por meio de simulação, com a utilização do software ANSYS, o modelo matemático é resolvido e o campo do fluxo de ar e de temperatura é obtido em função das configurações de ventilação consideradas (ventilação unilateral ou cruzada).

1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em cinco capítulos para melhor abordagem do tema e estão organizados da seguinte maneira:

No Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre o tema da ventilação natural, bem como a importância da ventilação nas edificações e os tipos e formas encontradas para que o conforto interno seja alcançado.

No capítulo 3 apresentam-se a metodologia adotada e as equações analíticas e empíricas que regem o fluxo de ar em um ambiente, bem como a definição das mesmas.

No capítulo 4 apresentam-se os procedimentos e resultados do atual trabalho, que são discutidos e analisados.

No capítulo 5 fazem-se observações finais do resultado e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural é o deslocamento do ar dentro do edifício através de aberturas, umas funcionando como entrada e outras como saída. Assim, as aberturas para ventilação deverão estar dimensionadas e posicionadas de modo a proporcionar um fluxo de ar adequado no recinto. O fluxo de ar que entra ou sai do edifício depende da diferença de pressão do ar entre os ambientes internos e externos, da resistência ao fluxo de ar oferecida pelas aberturas, pelas obstruções internas e de uma série de implicações relativas à incidência do vento e forma do edifício (TOLEDO, 1999; CLEZAR; NOGUEIRA, 1999; SCIGLIANO; HOLLO, 2001; COSTA, 2005).

Segundo Aynsley (2001), o efeito do vento no conforto durante o verão, proporciona uma condição de conforto térmico no interior de uma edificação que é alcançada por meio da ventilação natural quando, durante o dia, as velocidades do vento forem maiores e a umidade relativa menor do que o período da noite. Recentes estudos experimentais realizados pela Universidade de Loughborough demonstraram que o conforto térmico em uma edificação pode ser alcançado sem o emprego da ventilação mecânica na maioria dos dias de verão (EFTEKHARI *et al.*, 2001).

O excesso de calor, umidade, vento, ruído, etc, afetam a saúde e o bem-estar das pessoas. Essas e outras perturbações que ocorrem, muitas vezes, é chamado de estresse e depois de um certo tempo provocam, nas pessoas, doenças mais complexas, como diabetes, problemas cardiovasculares e respiratórios etc. Quando as trocas de calor entre o corpo e o meio ambiente são prejudicadas fala-se em estresse térmico. O conforto térmico é, em linhas gerais, obtido por trocas térmicas que dependem de vários fatores, ambientais ou pessoais, governados por processos físicos, como convecção, radiação, evaporação e, eventualmente, condução.

De acordo com Eftekhari *et al.*, (2001) o conforto térmico humano e sua resposta fisiológica ao estresse térmico dependem da produção de calor metabólico, do nível de fatores ambientais (velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa e temperatura média radiante) e do tipo de vestimenta que o indivíduo estiver usando. O efeito conjugado dos mesmos é que definirá o grau de conforto ou desconforto térmico sentido pelas pessoas.

A ocupação dos edifícios por pessoas, máquinas e equipamentos e a exposição à radiação solar resultam em aumento da temperatura interna do ambiente, em relação ao ambiente externo. Este acréscimo de temperatura deve ser combatido devido à necessidade de regular a temperatura corporal humana. A homeotermia se define pela capacidade de regulação da temperatura interna do organismo relativamente constante, em ambientes cujas condições térmicas são as mais variadas possíveis. Esta manutenção se faz por intermédio de seu aparelho termo-regulador, que comanda a redução ou aumento das perdas de calor pelo organismo por meio de alguns mecanismos de controle. Apesar de ser um meio natural de controle de perda de calor pelo organismo, esta regulação representa um esforço extra e, por conseguinte, uma queda de potencialidade de trabalho.

O resfriamento fisiológico é conseguido através da ventilação natural, pois esta promove a evaporação da umidade presente na pele humana e as trocas de calor por convecção, ao entrar em contato com a pele humana. Fundamental nos climas quentes e úmidos, pois a umidade presente na pele é a principal causa de desconforto, o resfriamento fisiológico tem entre seus principais fatores de contribuição a velocidade dos ventos, a temperatura e umidade do ar (TRINDADE, 2006).

Para melhorar a produtividade e o bem estar dos usuários de uma edificação nos serviços domésticos e/ou de escritórios e fábricas, uma quantidade grande de trabalhos científicos tem sido realizada com o objetivo de desenvolver modelos relatando percepções do conforto térmico e dos fenômenos físicos para uma melhor compreensão dos processos de transferência de energia que ocorrem numa edificação e como manter a qualidade do ar interno (FANGER, 1972; ASHRAE, 2004).

Segundo a American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioned Engineers (ASHRAE 55, 2004), a temperatura de conforto de 26°C é a ideal para pessoas em atividades sedentárias. Com ar parado (abaixo de 0,2 m/s), poderia ser elevada além dos 28,8°C se houvesse ventilação com velocidade acima dos 0,8 m/s, que é a velocidade limite imposta pela norma. Para os climas quentes e secos velocidades de até 2,0 m/s podem ser utilizadas, conseguindo até 4°C de decréscimo, enquanto a utilização de ventiladores somente chega a 2°C de diminuição. Quando a ventilação natural pode ser uma estratégia suficiente para a obtenção de um ambiente interno confortável, recursos de projeto devem ser utilizados, dentre os quais pode se destacar os seguintes: cuidados na forma e orientação da edificação, projetar espaços fluidos, facilitar a ventilação vertical (lanternins e exaustores), utilizar elementos para direcionar o fluxo de ar para o interior. As previsões de ventilação variam com o tipo de ambiente e com as condições climáticas. (SOUZA; MAZON, 2006).

Deste modo, a utilização das técnicas de ventilação natural deve ter como ponto primordial as questões climáticas regionais para que o conforto térmico desejado seja conseguido. Este clima regional, ou microclima, leva em conta fatores determinantes para a eficiência da ventilação natural, como a topografia, a presença de massas d'água no entorno, o grau de exposição ao sol e ventos, massa vegetal predominante, suas formas, dimensões e distribuição em torno da edificação. O terreno, a vegetação e as estruturas circundantes devem ter seu máximo aproveitamento para criação de áreas sombreadas e que favorecem a circulação do ar, conforme exemplificado na Figura 2.1 (NEVES, 2006).

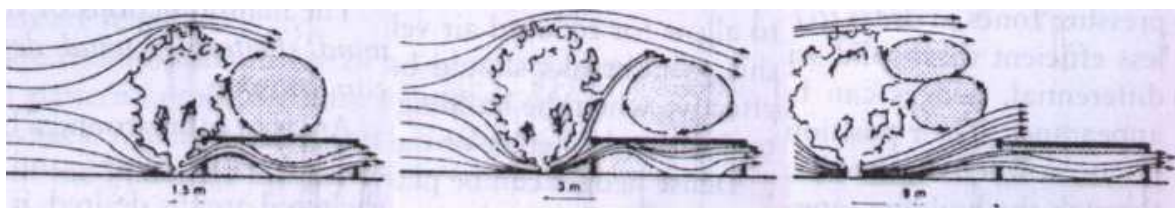


Figura 2.1 - Efeito de uma árvore sobre a direção do vento, com relação à sua distância do edifício
Fonte: NEVES, 2006.

A escolha na utilização de materiais de alta e baixa inércia térmica é influenciada, principalmente, pela forma de utilização da edificação. Quando se necessita de maiores perdas de calor, as vedações com materiais de alta inércia térmica

favorecem a maior diminuição da temperatura, aliada à utilização de elementos de transição, como as varandas. Quando a perda de calor deve ser evitada, o atraso térmico é conseguido através de vedações de baixa inércia térmica que atrasam a troca de calor, principalmente durante a noite (NEVES, 2006).

Um aspecto de suma importância na escolha das estratégias de ventilação natural é o consumo de energia. Em climas quentes e úmidos, o direcionamento constante da ventilação diretamente à zona de atividade resulta em uma sensação de conforto, evitando a utilização de estratégias e equipamentos mecânicos que, para provocar a movimentação do ar ou seu resfriamento, aumentam a temperatura externa, se tratando assim de um sistema passivo de condicionamento (NEVES, 2006).

2.1 Tipos de Ventilação Natural

A ventilação natural se dá através do movimento do ar entre o interior da edificação e o exterior, para o qual, a implantação das edificações tem grande influência na promoção ou diminuição da ventilação e dentro de uma edificação, por meio de diferenças de pressão ou de temperatura, pois o vento provoca uma pressão positiva sobre a face incidente da edificação (barlavento), e uma pressão negativa na face de sotavento, que depende da geometria do edifício, do posicionamento de suas aberturas, bem como velocidade e ângulo de incidência dos ventos (LAMBERTS; TRIANA, 2006).

A diferença de pressões exercidas pelo ar sobre um edifício pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar interno e externo, ou por ambas as forças agindo simultaneamente. A força dos ventos promove a movimentação do ar através do ambiente, produzindo a ventilação denominada ação dos ventos. O efeito da diferença de densidade provoca o chamado efeito chaminé, Figura 2.2.

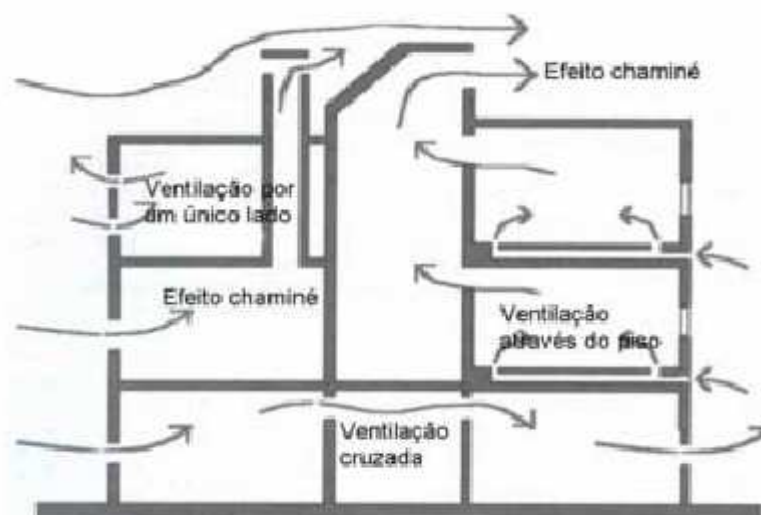


Figura 2.2 - Estratégias de ventilação natural para uma mesma ventilação
Fonte: LAMBERTS; TRIANA, 2006.

Estes dois mecanismos podem agir de maneira separada ou de forma combinada, dependendo das condições atmosféricas, do projeto e da localização do edifício. Para estudar os processos simultâneos de efeito chaminé e ação dos ventos, é necessário que se analise, previamente, se os dois mecanismos de ventilação não estão ocorrendo em oposição, isto é, se a ação do vento está realmente funcionando no sentido de proporcionar um incremento na ventilação do recinto. Esta análise deve ser feita pela observação, no projeto, do real papel das aberturas de saída de ar quando submetidas à ação do vento predominante. Caso se conclua que o vento não esteja contribuindo para o incremento da ventilação interna, é necessário reformular, no projeto, a proposta do sistema de aberturas destinado à ventilação, de modo a aproveitar a ação do vento. (LAMBERTS; TRIANA, 2006; FROTA; SCHIFFER, 2001).

2.1.1. Ventilação por ação dos ventos

A diferença de pressão exercida sobre o edifício pode ser causada pela ação dos ventos. O vento, considerado como o ar que se desloca paralelamente ao solo em movimento laminar e/ou turbulento, ao encontrar um obstáculo, o edifício, sofre um desvio de seus filetes e, ultrapassando o obstáculo, tende a retomar o regime laminar. As

paredes expostas ao vento estarão sujeitas a pressões positivas, enquanto as paredes não expostas ao vento e à superfície horizontal superior estarão sujeitas a pressões negativas. Esta situação proporciona condições de ventilação do ambiente pela abertura de vãos em paredes sujeitas a pressões positivas para entrada de ar e em paredes sujeitas a pressões negativas para saída de ar.

A distribuição das pressões sobre o edifício depende da direção dos ventos com relação ao edifício e do fato de estar exposto às correntes de ar ou protegido por outros edifícios ou qualquer obstáculo. A pressão exercida sobre um determinado ponto do edifício depende também da velocidade do vento e do seu ângulo de incidência. Como ilustrado na Figura 2.3 a face a barlavento é a área onde ocorre o fluxo livre de ar, a camada limite é a zona onde há a separação entre o fluxo livre de ar e sua recirculação, e a zona oposta à corrente de ar é chamada zona de sombra de vento (OLGYAY, 1998).

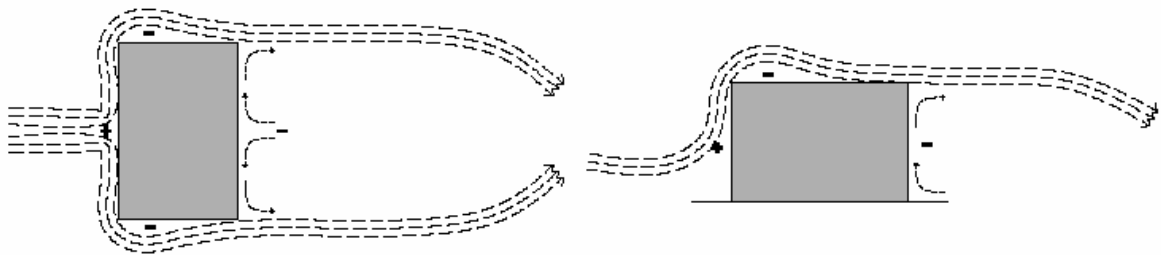


Figura 2.3 - Esquemas de corrente de ar ao redor da edificação – planta e corte
Fonte: OLGAYAY, 1998.

Para uma maior utilização dos ventos na obtenção do conforto térmico a orientação do edifício deve ter como objetivo maior captação dos ventos dominantes, a fim de criar as zonas de alta e baixa pressão. O espaçamento entre as edificações também é importante para que haja recuperação da velocidade do ar. Em edificações dispostas em fileira esse espaçamento é sete vezes a sua altura (OLGYAY, 1998).

O fluxo de ar em um ambiente é o determinante para a ventilação de conforto, pois mesmo que as trocas de ar sejam realizadas, se o fluxo de ar não atingir diretamente os ocupantes do edifício as trocas de calor não serão feitas de maneira

correta. Deste modo a ventilação de conforto é a utilização de um fluxo de ar significativo que atinge a zona de atividade de um ambiente, sendo a melhor posição para a entrada de ar nas aberturas entre 0,5 e 1,5 m acima do piso (NEVES, 2006).

2.1.2. Ventilação por efeito chaminé

O estudo da ventilação por efeito chaminé é feito considerando apenas as diferenças de pressão originadas das diferenças de temperatura do ar interno e externo ao edifício. Os ganhos de calor a que um edifício está submetido ocasionam a elevação de temperatura do ar contido no seu interior. O ar aquecido torna-se menos denso e com uma tendência natural à ascensão. Se um recinto dispuser de aberturas próximas ao piso e próximas ao teto ou no teto, o ar interno, mais aquecido que o externo terá a tendência de sair pelas aberturas altas, enquanto o ar externo, cuja temperatura é inferior à do interno, encontrará condições de entrar pelas aberturas baixas, Figura 2.4.



Figura 2.4 - Ventilação por Efeito Chaminé das salas de aula do Pavilhão de Aulas II da Universidade Federal de Viçosa

Para que a edificação seja ventilada devido à diferença de pressão provocada pelo vento, não basta que a mesma seja simplesmente exposta a ele. É necessário que os ambientes sejam atravessados transversalmente pelo fluxo de ar. Neste caso a taxa de ventilação aumenta com a diferença de temperatura do ar; pois o ar interno mais quente tende a sair através de aberturas mais altas das edificações, sendo substituído pelo ar mais frio que entra através das aberturas mais baixas. A distância vertical entre as aberturas influi aumentando a taxa de ventilação, quanto maior a distância na altura entre as aberturas. Esta medida de ventilação funciona em edifícios com torres de ventilação, e/ou com pé direito alto com aberturas localizadas na cobertura (LAMBERTS; TRIANA, 2006; NEVES, 2006).

2.1.3. Ventilação Cruzada

Em linhas gerais, ventilação cruzada é a circulação do ar através de aberturas situadas em lados opostos de um ambiente. A circulação do ar é facilitada porque as aberturas de entrada de ar são situadas em zonas de alta pressão e as aberturas de saída de ar localizam-se em zonas de baixa pressão. As aberturas de ventilação são, normalmente, janelas. Assim, as aberturas de entrada de ventilação devem ser locadas em um nível mais baixo que as de saída, Figura 2.5.

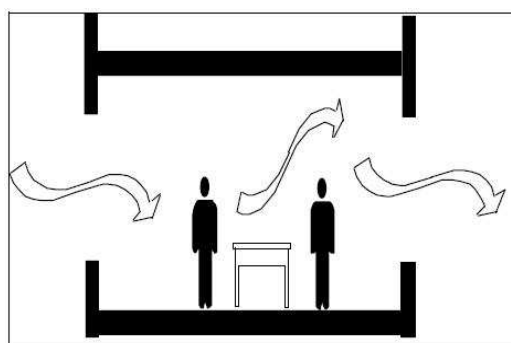


Figura 2.5 - Ventilação cruzada numa edificação de um só pavimento
Fonte: MARTIN; FITZSIMMONS, 2000.

A quantidade de acessos ao exterior não é o fator predominante nesta estratégia de ventilação. Mesmo com a presença significativa de ventos, caso não haja grandes diferenças de pressão entre as aberturas, não haverá correntes cruzadas (NEVES, 2006). A configuração do fluxo de ar é determinada pelo tamanho e localização das aberturas de entrada do ar na parede, quanto mais perpendicular for a abertura em relação à direção do vento predominante maior será a eficiência, bem como a configuração das aberturas utilizadas e a localização de outros componentes arquitetônicos próximos às aberturas, Figura 2.6 (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005).

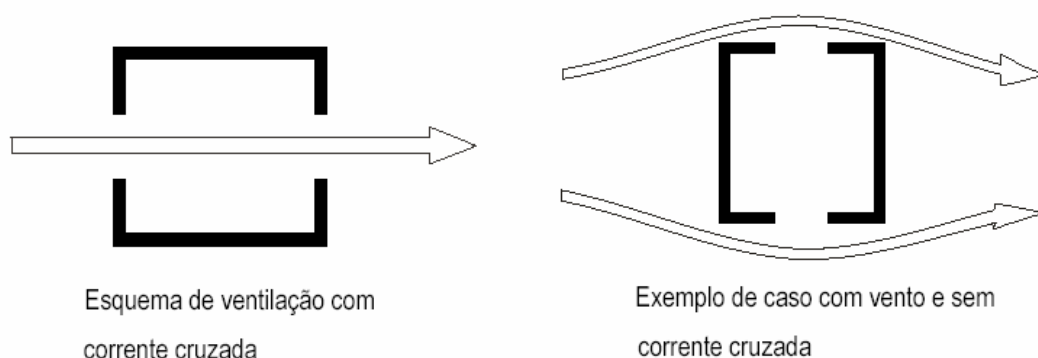


Figura 2.6 - Esquemas de ventilação com e sem corrente cruzada
Fonte: NEVES, 2006.

Para uma melhor utilização dos sistemas de ventilação cruzada é necessário que haja uma mudança na direção do ar no ambiente, ao invés deste ir diretamente para a saída. Em aberturas encontradas em posições opostas, o ar atinge uma região limitada e alcança a saída com uma velocidade mais alta. No entanto quando o ar entra obliquamente no ambiente ou é forçado a mudar de direção, a velocidade do mesmo é reduzida e este alcança um maior volume interno, proporcionando maior área de ventilação, devido à turbulência gerada, Figura 2.7 (GIVONI, 1998).

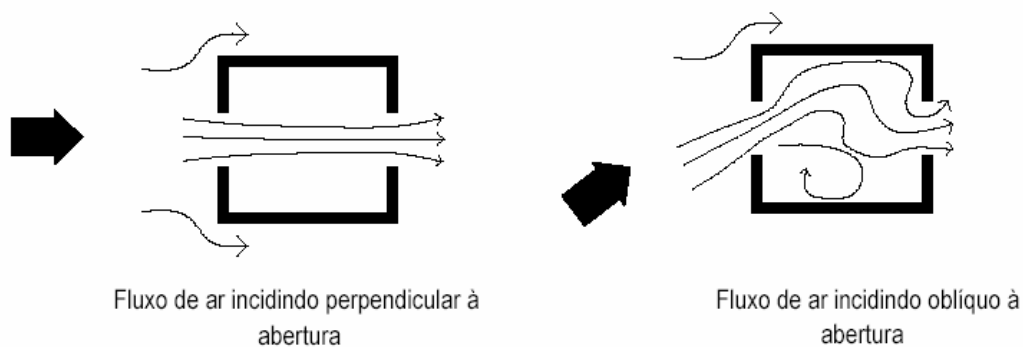


Figura 2.7 - Incidência do ar e sua distribuição interna
Fonte: GIVONI, 1998.

No entanto, quando as aberturas se encontram em paredes adjacentes, a direção do fluxo de ar se comporta de maneira oposta, comparado que se as aberturas encontram em paredes opostas. O vento perpendicular à abertura amplia a variação na direção do fluxo, o que resulta em melhor distribuição de ventilação por criação de turbulência, o que não acontece para o fluxo oblíquo, Figura 2.8 (NEVES, 2006).

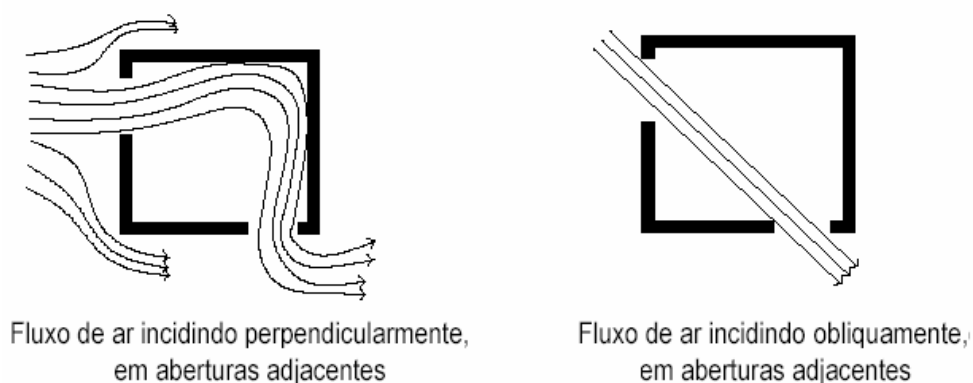


Figura 2.8 - Efeito do fluxo de ar em aberturas adjacentes
Fonte: NEVES, 2006.

Além da posição da abertura, o tipo de abertura também influencia na determinação da eficiência da utilização da estratégia de ventilação cruzada. A resistência oferecida ao fluxo de ar por estas aberturas influenciam diretamente em sua intensidade e direcionamento. Elementos externos como projeções verticais e horizontais, bem como, vegetação próxima, mudam o padrão e velocidade do vento. As subdivisões internas da edificação também influenciam no fluxo de ar, deste modo

qualquer obstrução deve ser evitada para que não ocorram reduções acentuadas na velocidade do ar antes deste encontrar sua saída (NEVES, 2006).

2.1.4. Ventilação Unilateral

A ventilação unilateral é aquela que ocorre através de aberturas situadas em um único lado de um ambiente, Figura 2.9.

A ventilação unilateral só é eficiente para um cômodo simples, caracterizando-se como uma solução de ventilação local. Comparada às outras alternativas, a ventilação unilateral é a solução menos atraente, mas que pode servir muito bem a escritórios.

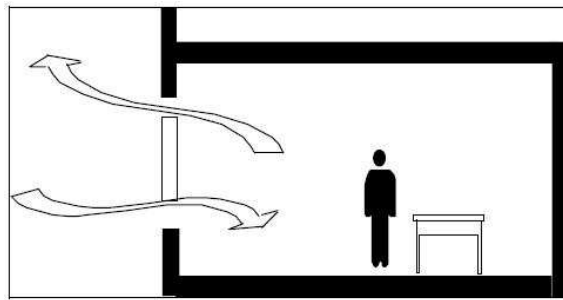


Figura 2.9 – Ventilação unilateral numa edificação de um só pavimento
Fonte: MARTIN; FITZSIMMONS, 2000.

2.2 A Importância da Ventilação

A ventilação é uma estratégia de resfriamento ou perda de calor de um ambiente por meio da renovação do ar, permitindo aos ocupantes de um espaço, atingir a sensação de conforto, com o aumento das trocas de calor por convecção na superfície do corpo. A obtenção de conforto por meio desta estratégia pode ser de forma direta ou indireta, sua eficiência e importância dependem das condições climáticas de cada região e deve obedecer ao tipo de ocupação das pessoas dentro do ambiente (FROTA; SCHIFFER, 2001).

De acordo com o tipo de necessidade de ventilação existem diferentes categorias quanto aos níveis de fluxo de ar. A ventilação pode ser constante quando se tem a intenção de controlar a qualidade do ar, servindo para todos os tipos de clima, sendo essencial em regiões de clima frio. Nas regiões áridas, com grandes amplitudes térmicas diárias é importante a ventilação através da utilização do resfriamento noturno mantendo a temperatura interna diurna menor que a externa. E, ainda em climas quentes, pode-se recorrer a estratégias de promoção de perda de temperatura por convecção através do aumento da velocidade do ar (GIVONI, 1998).

Um dos primeiros critérios de ventilação dos ambientes se baseia nos requisitos mínimos de exigência humana, os quais são o suprimento de oxigênio e a concentração máxima de gás carbônico no ar, sendo que a diminuição da concentração deste último requer maiores taxas de ventilação que o de suprimento de oxigênio. Além destes fatores, também estão envolvidas a desconcentração de odores corporais, o aumento da umidade do ar pela respiração e a remoção do excesso de calor do ambiente. Os excessivos ganhos de calor solar, assim como o calor gerado no próprio ambiente, devido à presença de fontes diversas podem provocar o desconforto térmico, o qual é combatido pelo uso da ventilação (COSTA, 2005).

O planejamento da ventilação de uma edificação deve aproveitar ao máximo os ventos dominantes no local, por meio da orientação das aberturas em relação a estes. Além dos recursos acima citados deve-se também avaliar algumas modificações no projeto da habitação, visando primeiramente verificar a influência do posicionamento das aberturas nas fachadas, a dimensão destas aberturas de entrada e saída de ar, o tipo e a configuração das mesmas e os elementos arquitetônicos que influenciam na circulação de ar, e posteriormente o efeito da posição relativa destas edificações no terreno, para determinação das melhores condições de conforto e salubridade de seus ocupantes (TOLEDO, 1999).

A velocidade do fluxo de ar interno tem ligação com a dimensão das aberturas de entrada e saída. Segundo Trindade (2006), quando as aberturas de entrada são menores que as de saída de ar, obtêm-se maiores velocidades de fluxo. No entanto, outro fator que influencia este deslocamento interno é o ângulo de orientação do edifício

e suas aberturas, as quais devem estar dispostas em pelo menos 60° em relação aos ventos dominantes para uma boa captação de ventilação (GIVONI, 1998). Outro aspecto relevante é o posicionamento destas aberturas, pois com relação à renovação higiênica do ar as aberturas acima dos usuários são eficazes, no entanto para resfriamento fisiológico dos mesmos é inadequado, como pode ser observado na Figura 2.10 (TRINDADE, 2006; LAMBERTS; TRIANA, 2006).

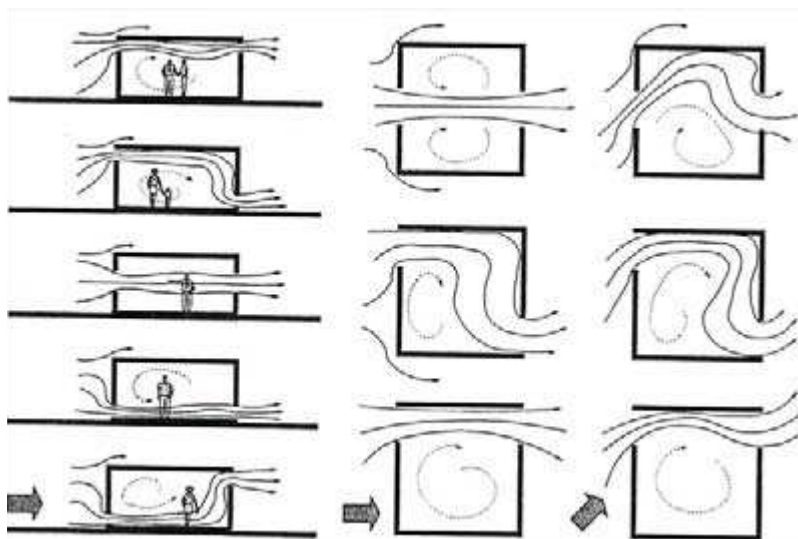


Figura 2.10 - Posição das aberturas verticais e horizontais em relação ao efeito do fluxo interno de ar das edificações
Fonte: TRINDADE, 2006.

A utilização da ventilação para o resfriamento passivo da edificação e para melhoria do conforto dos ocupantes depende da incidência de ventos no local. Para locais com vento estável e intensidade maior que 3m/s, a ventilação é a estratégia de refrigeração mais simples e eficiente, enquanto que o vento pode ser indesejável para temperaturas acima de 34°C, sendo também importante considerar o uso de ventilação mecânica complementar em períodos de calmaria (BITTENCOURT; CANDIDO, 2005).

O posicionamento horizontal das aberturas provoca melhor distribuição do ar quando as aberturas não estão frente a frente. Em relação ao posicionamento vertical, estes elementos de fachada podem incrementar a ventilação, pois captam as correntes que poderiam desviar da edificação. Além do posicionamento vertical e horizontal a

forma das aberturas também influencia na velocidade do ar, segundo Bittencourt, (1993), aberturas retangulares permitem maiores velocidades do ar, sobretudo com ângulos oblíquos à fachada. Para as condições de clima quente e úmido as esquadrias que permitem o fluxo contínuo de ar são as mais adequadas, dentre estas estão as venezianas e os elementos vazados.

2.3 Ventilação Natural como Estratégia Bioclimática

A sensação de conforto ou desconforto térmico experimentado pelo homem no interior de um recinto depende da atividade desenvolvida e do tipo de roupa usada e também da temperatura, umidade e velocidade do ar em contato com o corpo e das temperaturas e emissividades das superfícies das paredes, piso, teto e objetos existentes no local.

As exigências humanas de conforto térmico estão relacionadas com o funcionamento de seu organismo, ou seja, o homem precisa liberar calor em quantidade suficiente para que sua temperatura interna se mantenha constante. Quando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente ocorrem sem maior esforço, a sensação do indivíduo é de conforto térmico, e sua disposição e capacidade de trabalho, desse ponto de vista, são máximas. Se as condições térmicas ambientais causam sensação de frio ou calor, é porque o organismo está perdendo mais ou menos calor que o necessário para a homeotermia, que passa a ser conseguida com esforço adicional. Uma situação de desconforto afeta o desempenho no trabalho que a pessoa exerce e, quando esta situação é prolongada, pode até causar enfermidades, sendo também a principal causa de sintomas desagradáveis, tais como cansaço, desânimo, perda de concentração (TOLEDO, 1999).

Dessa forma, verifica-se que a obtenção do conforto térmico pelos ocupantes de um ambiente é de fundamental importância desde a fase do projeto arquitetônico, uma vez que tal conforto compromete a produtividade das pessoas que ocupam o ambiente. A incorporação de conceitos bioclimáticas à edificação, desde a concepção do projeto, é uma das práticas mais eficientes e baratas para economia de energia em edificações (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

O desenvolvimento sustentável se define por ser aquele que atende às necessidades da sociedade atual sem comprometer as gerações futuras. O conceito de estratégias bioclimáticas tem forte relação com o desenvolvimento sustentável pela estreita relação entre o conforto ambiental e o consumo de energia, presente nos sistemas convencionais de condicionamento ambiental artificial e de iluminação artificial (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

Na concepção de projetos bioclimáticos todos os condicionantes climáticos devem ser considerados para otimização das condições interiores e exteriores. Deste modo, a orientação solar, os ventos dominantes, a umidade, entre outros são determinantes para a concepção de aberturas, proteções solares, materiais utilizados, dentre outros aspectos (LAMBERTS; TRIANA, 2006).

As edificações que adotam a estratégia da ventilação natural estão em conformidade com as Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho do Ministério do Trabalho (NR), em especial a NR 8 que trata de Edificações e a NR 9 sobre o Programa de Prevenção de Riscos Ambientais. Também estão de acordo com a NBR 15220:2005 sobre o Desempenho Térmico de Edificações.

As edificações utilizam ao menos 50% de toda energia utilizada no planeta. Deste percentual, a maior parte destina-se a equipamentos voltados para aquecimento, resfriamento e iluminação. A utilização de estratégias mecânicas por meio do uso de equipamentos para obtenção de conforto bioclimático, promove também uma maior contribuição para o aumento das emissões de dióxido de carbono, além de, ao longo do tempo o seu uso indiscriminado promoveu a não adequação das edificações às condições climáticas de cada região (MACIEL, 2006).

Sobre a perspectiva do consumo desagregado por usos finais em edifícios do setor comercial na cidade de São Paulo, trabalhos de pesquisa identificaram que 70% desse consumo era direcionado à iluminação artificial e aos sistemas de ar condicionado, enquanto o projeto arquitetônico era pouco, ou nada, influenciado por preocupações com a conservação de energia (ROMERO, 1998).

Dadas as perspectivas do crescente consumo de energia em âmbito nacional, medidas de conservação de energia são uma necessidade iminente. Da década de 1990 até 2006, ano em que foi realizado o último Balanço Energético Nacional, o aumento da demanda por energia elétrica, apenas no setor comercial, foi de 35,44%, enquanto a geração por meio de hidrelétricas foi acrescida em 26,9% (BRASIL, 2006). Essa diferença aponta para a urgência do uso racional de energia em edifícios, entre outras medidas.

Nesse contexto, projetos de arquitetura que apresentem soluções para lidar com as condições ambientais locais, envolvendo temperatura do ar, temperatura superficial, umidade, radiação solar, ventos, ruído e, ainda qualidade do ar, aliadas a um bom aproveitamento da luz natural, estão contribuindo para a realização de uma arquitetura de menor impacto ambiental, no que concerne a questão da energia (TOLEDO, 1999).

Os conceitos bioclimáticos geralmente não são integrados na prática do projeto como parte do partido arquitetônico. Em geral, há apenas uma simples adição de sistemas voltados para a conservação de energia, durante o detalhamento do projeto. Além disso, o apelo para a integração destes conceitos tem sido mais baseado em pressões de ordem econômica, o que parece muito limitado. Os esforços para introduzir esses temas não têm sido baseados nas reais necessidades de projeto do arquiteto. Além disso, não há informações consolidadas sobre quais são as barreiras reais à integração bioclimática, de acordo com o ponto de vista dos arquitetos (MACIEL, 2006).

Existem estratégias de elaboração e construção de edificações por meio das quais se pode aperfeiçoar a comodidade e a eficiência energética das mesmas. Estas estratégias que se atentam para as condições climáticas do local, proporcionando a adequação do edifício ao clima, se denominam Estratégias Bioclimáticas. Nestas estão presentes as regras gerais que se destinam a orientar a concepção do edifício para que haja o maior aproveitamento possível das condições climáticas do meio (LAMBERTS *et al*, 1997; NBR 15220:2005, PINTO, 2005).

O conhecimento do clima, aliado ao conhecimento dos mecanismos de troca de calor e do comportamento térmico dos materiais, permite uma intervenção consciente da

arquitetura, incorporando os dados relativos ao meio ambiente externo, de modo a aproveitar o que o clima apresenta de favorável e amenizar seus aspectos negativos. A associação destes conceitos bioclimáticos na concepção dos projetos de edifícios, promove um elevado potencial de conservação de energia mantendo o conforto dos ocupantes. Segundo ROMERO (1998), após avaliação paramétrica de elementos básicos de projetos de quatro edifícios em São Paulo, alcançou-se até 12,1% de potencial de conservação de energia. A seguir, destacam-se alguns aspectos a serem considerados no momento da concepção de um projeto arquitetônico (MACIEL, 2006): incidência solar, condução de calor no sistema de fechamento e ventilação natural.

2.4 Métodos de Cálculo da Ventilação

Os processos físicos envolvidos na ventilação são complexos, especificamente na ventilação natural, e a interpretação do seu papel na eficiência da ventilação é uma tarefa difícil (ALLARD, 1998).

O conhecimento das características específicas do escoamento de ar num espaço, bem como as taxas de ventilação em edifícios, é necessário por razões de conforto e energia. Um projeto de ventilação passa por várias fases, iniciando-se com a determinação dos fluxos de ar envolvidos, de modo a garantir as taxas de renovação de ar necessárias. Seguidamente, há que distribuir esse fluxo de ar pelos espaços de modo a dimensionar e posicionar as aberturas de entrada e saída, garantindo que a velocidade do ar no interior do espaço a ventilar não exceda a valores característicos de conforto. De acordo com o tipo de informação requerida, vários modelos e ferramentas podem ser usadas. Os modelos variam de algoritmos empíricos simples, para calcular a taxa de ventilação global, até técnicas sofisticadas de dinâmica dos fluidos computacional que resolvem as equações de Navier-Stokes (ALLARD, 1998).

De modo geral, baseado no nível de complexidade do modelo, quatro modelos diferentes podem ser utilizados para a descrição do fluxo de ar para o caso da ventilação

natural em edificações (SANTAMOURIS, 1998): modelos empíricos; modelos em rede; modelos em zona e modelos computacionais.

É muito importante notar que o uso de modelos determinísticos para prever as taxas de ventilação natural é baseado em pressuposições que freqüentemente falham na descrição das reais condições, o que afeta a exatidão dos resultados quando comparados com valores experimentais.

Para se calcular o fluxo de ar pela edificação tem-se que conhecer a velocidade do vento. O vento natural é turbulento e sua velocidade média varia com a altura a partir do solo. A velocidade do vento, normalmente fornecida por estações meteorológicas a 10 metros de altura deve ser corrigida para a altura de interesse,

$$v_z = v_{10} \cdot k \cdot z^a \quad (2.1)$$

onde v_z é a velocidade do vento na altura de referência z (m/s); v_{10} é a velocidade do vento a 10 m de altura em campo aberto (m/s); z é a altura da cumeeira para edificações de até dois andares ou a altura da janela para edificações mais altas; k e a são coeficientes que dependem da localização (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Coeficientes para determinação da velocidade média do vento

Localização da edificação	k	a
Campo aberto e plano	0,68	0,17
Campo com algumas barreiras	0,52	0,20
Ambiente urbano	0,40	0,25
Centro da cidade	0,31	0,33

Fonte: ETHERIDGE; SANDBERG, 1996.

O vento dá origem a um escoamento de ar à volta do edifício que resulta em zonas da envolvente com pressão estática superior à pressão atmosférica, bem como a outras zonas com pressão estática inferior à atmosférica. As primeiras ocorrem, sobretudo, nas zonas da envolvente expostas diretamente à incidência do vento (barlavento), enquanto que as últimas predominam nas zonas da envolvente do lado

oposto ao da direção do vento (sotavento) e, também, nas coberturas, particularmente nas coberturas planas ou de fraca inclinação, onde ocorrem zonas de recirculação, devido à separação do escoamento.

O vento ao incidir sobre a edificação exerce pressões positivas (sobrepessões) nas paredes expostas ao vento, enquanto as paredes não expostas ao vento e à superfície horizontal superior estarão sujeitas a pressões negativas (subpressões), Figura 2.11.

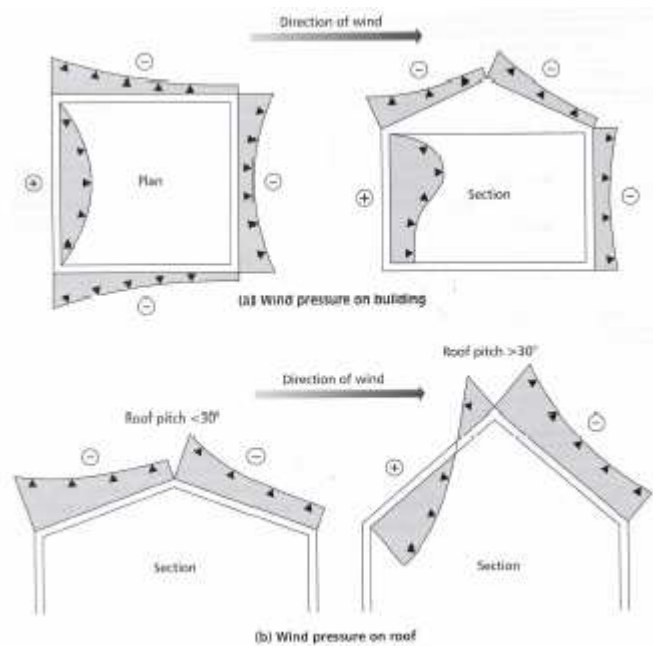


Figura 2.11 - Distribuições de pressão resultante da ação do vento.
Fonte: ENVIRONMENTAL..., 1999.

Os coeficientes de pressão variam com a direção do vento em relação à edificação, a orientação do edifício, a topografia, a rugosidade do terreno e os obstáculos vizinhos, e podem ser determinados pela expressão:

$$C_p = \frac{(p - p_0)}{1/2 \cdot \rho \cdot v_z^2} \quad (2.2)$$

onde, C_p é o coeficiente de pressão, p é a pressão instantânea média (Pa), p_0 é a pressão de referência para o vento livre (Pa), ρ é a densidade do ar (kg/m^3) e v_z é a velocidade do vento de referência (m/s).

2.4.1. Métodos Empíricos para cálculo da vazão de ar

Alguns modelos empíricos, para o cálculo do fluxo de ar, são encontrados na literatura tais como o modelo da norma Britânica BS 5925: 1980, da ASHRAE (1997), PHAFF; de GIDDS (1980), GIVONI (1978), CSTB (1992).

A maioria dos projetistas emprega os modelos empíricos para previsão da ventilação natural, uma vez que estes modelos oferecem uma estimativa inicial da taxa de ventilação e a velocidade média do ar, que são duas medidas importantes para avaliar o desempenho térmico em uma edificação.

Dentre os modelos empíricos citados anteriormente apresenta-se o modelo da norma Britânica BS 5925: 1991, utilizado no presente trabalho para comparação com as simulações em CFD.

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

2.4.1.1. Ventilação Cruzada

Considerando somente a ação do vento, Figura 2.12, a vazão de ar é dada por:

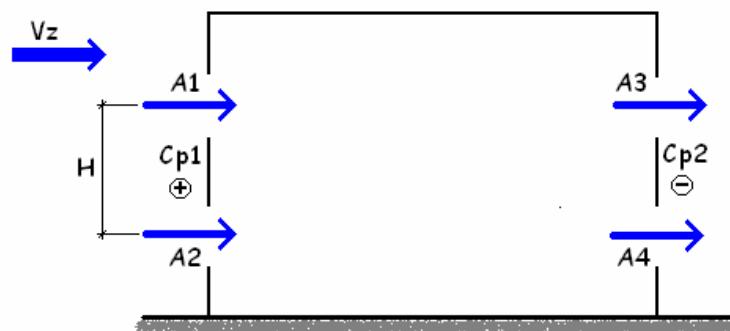


Figura 2.12 - Ventilação cruzada devida ação dos ventos, com duas aberturas por fachada

$$Q_w = C_d \cdot A_w \cdot v_z \cdot \sqrt{\Delta C_p} \quad (2.3)$$

onde, Q_w é a vazão de ar pela ação dos ventos (m^3/s), C_d é o coeficiente de descarga referente à perda de carga por ação dos ventos ($\approx 0,61$), A_w é a área equivalente das aberturas (m^2), v_z é a velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s), C_{p1} é o coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar, C_{p2} é o coeficiente de pressão da abertura de saída de ar, ΔC_p é a variação dos coeficientes de pressão ($\Delta C_p = C_{p1} - C_{p2}$).

No que se refere à A_w , será função das áreas das aberturas de entrada e de saída do ar, dentro da seguinte relação

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(\sum A_{\text{entrada}})^2} + \frac{1}{(\sum A_{\text{saída}})^2} \quad (2.4)$$

Para a configuração apresentada na Figura 2.12, resulta

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad (2.5)$$

Nos casos de espaços com pé-direito mais elevado que possam incluir mais do que uma abertura na fachada, Figura 2.12, considera-se que os coeficientes de descarga são iguais nas duas aberturas.

Considerando a ação somente da diferença de temperatura, Figura 2.13, tem-se:

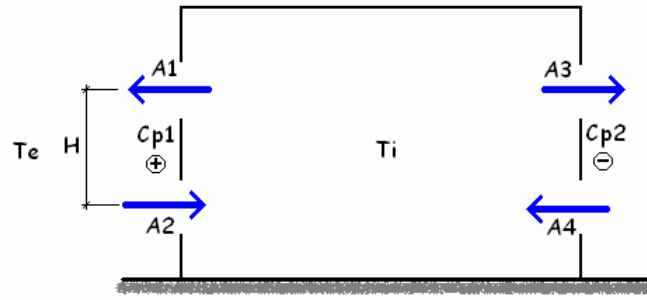


Figura 2.13 - Ventilação cruzada devida ação da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada

$$Q_b = C_d A_b \sqrt{\frac{2\Delta T g H}{T_e}} \quad (2.6)$$

onde, Q_b é a vazão de ar pela ação da temperatura (m^3/s), C_d é o coeficiente de descarga referente à perda de carga (0,6), T_e é a temperatura externa (K), T_i é a temperatura interna (K), ΔT é a variação de temperatura ($\Delta T = T_i - T_e$), \bar{T} é a temperatura média $\bar{T} = (T_i + T_e)/2$, g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), H é a altura entre duas aberturas verticais (m), A_b é a área equivalente das aberturas (m^2), dada pela Eq. (2.7),

$$\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2} \quad (2.7)$$

Considerando o efeito combinado de vento e diferença de temperatura (Figura 2.14), tem-se:

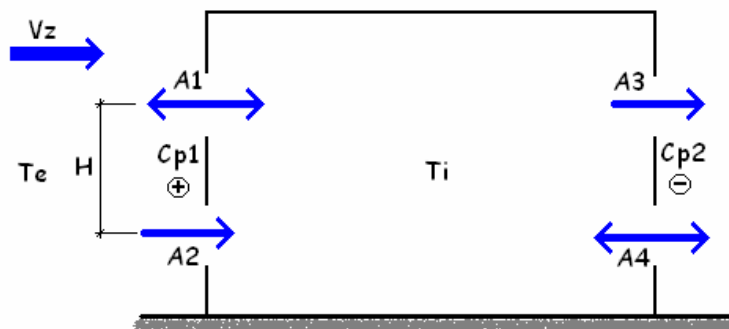


Figura 2.14 – Ventilação cruzada devida ação combinada dos ventos e da diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada

$$Q = Q_b \quad \text{para} \quad \frac{v_z}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w}} \sqrt{\frac{H}{\Delta C_p}} \quad (2.8)$$

$$Q = Q_w \quad \text{para} \quad \frac{v_z}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \sqrt{\frac{A_b}{A_w}} \sqrt{\frac{H}{\Delta C_p}} \quad (2.9)$$

2.4.1.2. Ventilação Unilateral

A ventilação unilateral principalmente com uma única abertura (Figura 2.15) pode ser aplicada, por exemplo, a escritórios ou a pequenos espaços comerciais em que profundidade do espaço é reduzida. A vazão de ar, admitindo somente a ação dos ventos, pode ser dada por

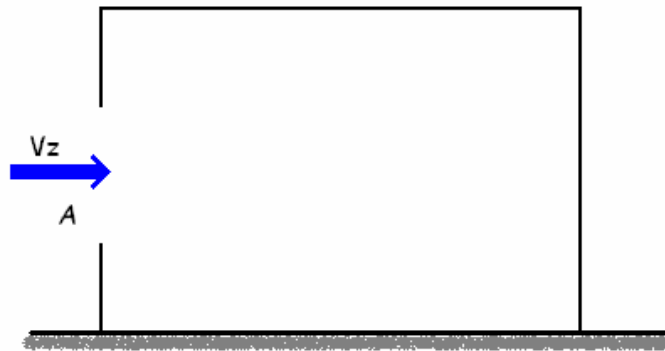


Figura 2.15 – Ventilação unilateral devida à ação dos ventos em uma única abertura

$$Q_w = 0,025 A v_z \quad (2.10)$$

onde, A é a área da abertura (m^2), v_z é a velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s).

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

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

Considerando somente diferença de temperatura, Figura 2.16,

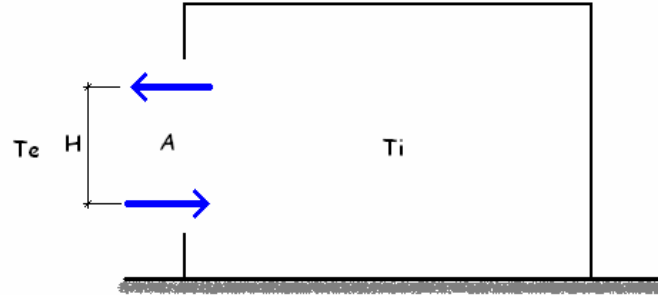


Figura 2.16 – Ventilação unilateral devida ação da diferença de temperatura em uma única abertura

$$Q_b = C_d \frac{A}{3} \sqrt{\frac{\Delta T g H}{\bar{T}}} \quad (2.11)$$

Considerando somente diferença de temperatura com duas aberturas (Figura 2.17)

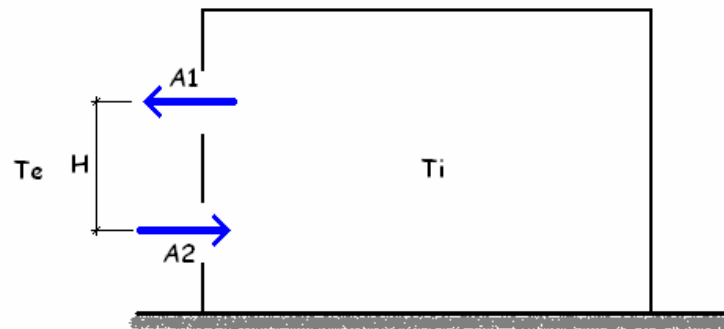


Figura 2.17 - Ventilação unilateral devida à ação da temperatura em duas aberturas

$$Q_b = C_d A \left[\sqrt{2} \frac{\varepsilon}{(1 + \varepsilon) \sqrt{(1 + \varepsilon^2)}} \right] \sqrt{\frac{\Delta T g H}{\bar{T}}} \quad (2.12)$$

onde, $\varepsilon = A_1 / A_2$ e $A = A_1 + A_2$.

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

$$Q = \sqrt{(Q_w)^2 + (Q_b)^2} \quad (2.13)$$

Os demais modelos empíricos citados anteriormente são apresentados no ANEXO A.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA ADOTADA

Como exposto anteriormente, a eficiência da ventilação natural numa edificação está associada a inúmeros fatores, tais como a posição da edificação em relação às condições climáticas, quanto ao número, posição, tipo e tamanho das aberturas existentes para a passagem de ar, dentre muitos outros fatores, como o perfil de ocupação do ambiente. No presente trabalho, verifica-se a influência da fonte de calor no ambiente interno considerando as configurações de ventilação cruzada e ventilação unilateral, utilizando uma abordagem numérica na avaliação da distribuição do ar e da temperatura no ambiente interno, num ambiente típico de escritório.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas são comparados com equações empíricas encontradas na literatura.

3.1. Simulação Numérica

A recente preocupação com a otimização energética de edifícios tem levado à utilização crescente de ferramentas de simulação numérica na análise dos processos de transferência de energia. Este tipo de ferramenta computacional permite prever temperaturas interiores (ar e superfícies), cargas térmicas, consumo de energia, níveis de iluminação, taxas de ventilação natural etc. Estas previsões, normalmente efetuadas para um ano típico de clima local, revelam-se muitas vezes fundamentais nas decisões de projeto, sobretudo na fase inicial do trabalho.

Atualmente, existem muitos programas computacionais voltados para a análise do escoamento interno de fluxo em um ambiente. A simulação computacional

representa, dentro da evolução tecnológica, a melhor solução para se prognosticar o comportamento térmico e o perfil do fluxo do ar no interior das edificações.

Neste trabalho utiliza-se a ferramenta fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) que estuda numericamente escoamentos em geral. Basicamente, a CFD é composta de diversas técnicas numéricas que são aplicadas às equações de conservação de movimento, massa e energia, utilizando o método numérico dos Elementos Finitos.

Dentre os vários programas comerciais para simulação numérica computacional em CFD foi utilizado neste trabalho o software comercial de fluidodinâmica computacional “ANSYS MULTIPHYSICS 11.0” da ANSYS Technology, que tem integrado o módulo dedicado à análise por CFD “ANSYS/FLOTRAN”.

3.2. Modelo Analítico

O aspecto físico de um escoamento de fluido é governado pelas equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia, estes três princípios fundamentais são expressos por um conjunto de equações diferenciais parciais. De uma forma genérica tem-se:

$$\frac{\partial(\rho u_i \varphi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade; S_φ é o termo fonte e representa uma taxa de geração por unidade volume da variável dependente φ ; Γ_φ é o coeficiente de difusão de φ . As variáveis dependentes de interesse são as três componentes da velocidade u , v , w , a pressão p , a temperatura T , a energia cinética k e a taxa de dissipação turbulenta ε .

O módulo CFD utiliza estes princípios para poder efetuar as simulações, que é constituída pelos seguintes passos:

1º. Modelar a forma do fluido que vai ser analisado, nesta fase é realizada a descrição do modelo físico, que pode ser efetuado com extrema facilidade com o auxílio de softwares de “Computational Added Design” CAD ou até mesmo no software de CFD. As diferentes formas geométricas, como por exemplo, as divisões internas, dimensão e localização das aberturas, correspondem às diferentes formas das edificações. Na Figura 3.1 apresenta-se um modelo bidimensional.

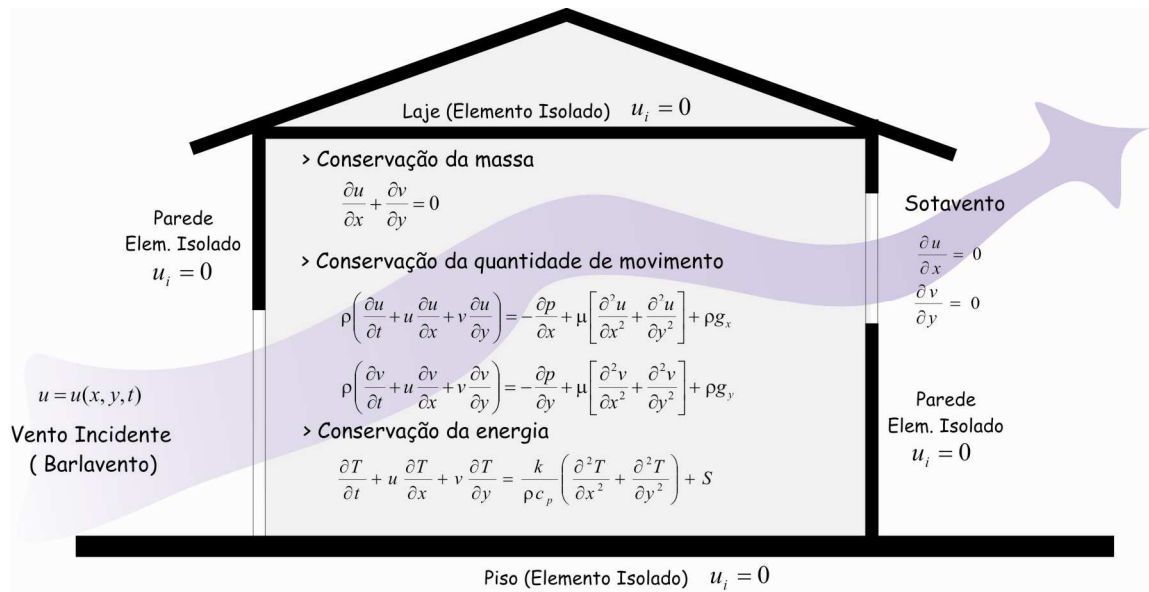


Figura 3.1 - Princípios que regem o escoamento

2º. Subdividir toda a região fluida modelada em células ou elementos formando assim a malha, o que pode ser efetuado manualmente ou automaticamente pelo próprio software de CFD. As equações governantes de conservação de massa, quantidade de movimento e energia são impostas em todas as células. Na Figura 3.2 apresenta-se para um caso bidimensional.

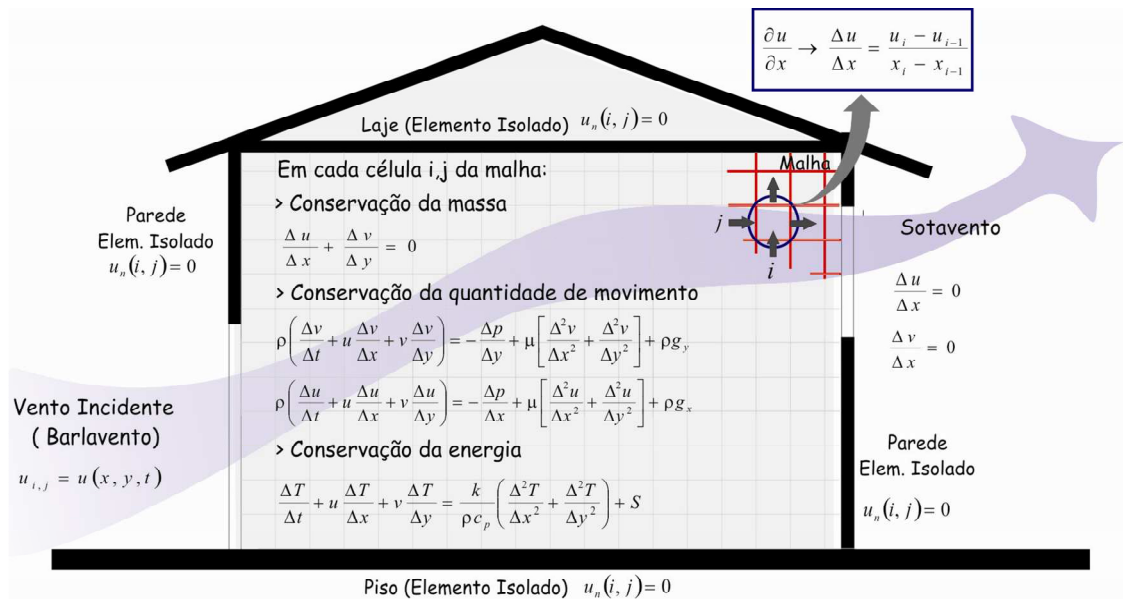


Figura 3.2 - Discretização do Elemento

3º. Aplicar as condições de contorno nas células correspondentes às paredes e em outros pontos onde os dados já são conhecidos, ou seja, especificar velocidades, temperaturas e pressões entre outros (valores experimentais ou pré-determinados) nos pontos onde os mesmos já são conhecidos para que o software possa calculá-las.

4º. Visualizar os resultados, onde o software proporcionar variadas formas, bastando ao usuário escolher a forma que lhe é conveniente. Nesta etapa cabe ao usuário ter uma visão crítica, não aceitando ou rejeitando o modelo apenas pelos resultados obtidos.

3.3. Programa Computacional

O software ANSYS (2007) utiliza o Método dos Elementos Finitos o qual permite a construção da geometria do problema e geração de malhas, de acordo com a configuração do ambiente. As funções necessárias para se obter uma solução e mostrar os resultados são acessíveis por meio de uma interface interativa. Este programa fornece certa flexibilidade com relação às malhas empregadas, podendo os problemas de escoamento ser resolvidos com vários tipos de malhas. Com esta capacidade de alterar a

malha com base na solução do escoamento, torna-se mais fácil determinar a malha ideal para o problema em estado.

O ANSYS/FLOTTRAN é uma opção simplificada do FLOTTRAN CFD (Computational Fluid Dynamic) que possui o elemento FLUID141 para análise bidimensional, Figura 3.3, e o elemento FLUID142 para análise tridimensional, Figura 3.4. No caso em estudo, utilizou-se o elemento tridimensional do tipo FLUID142, onde as velocidades são obtidas por meio do princípio de conservação da quantidade de movimento, a pressão é obtida por meio do princípio de conservação da massa e a temperatura é obtida por meio da lei de conservação da energia.

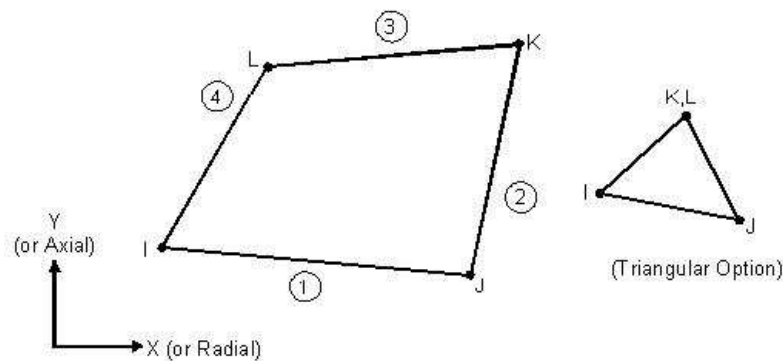


Figura 3.3 - Elemento FLUID141
Fonte: ANSYS, 2007.

O elemento FLUID142 pode ser utilizado para modelo transiente ou permanente que envolve regiões fluidas e/ou não fluidas. As equações de conservação para fluxo fluido viscoso e energia são resolvidas na região fluida, enquanto só a equação de energia é resolvida em uma região não fluida. Na Figura 3.4 mostra-se a geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento. O elemento é definido por 8 nós e pela propriedade do material. Um elemento de forma tetraédrica pode ser formado, considerando-se o mesmo número de nó para os nós M, N, O e P e o mesmo número de nó para os nós K e L. Um elemento em forma de cunha ou pirâmide também pode ser usado como mostrado na Figura 3.4 (ANSYS, 2007).

A malha de elementos finitos pode ser gerada automaticamente pelo ANSYS a partir das informações fornecidas sobre o tipo de elemento e sobre outros parâmetros que controlam o número de elementos utilizados na geração automática.

Na discretização do ambiente fluido utilizam-se malhas triangulares onde seu tamanho é definido de acordo com a necessidade de precisão dos resultados.

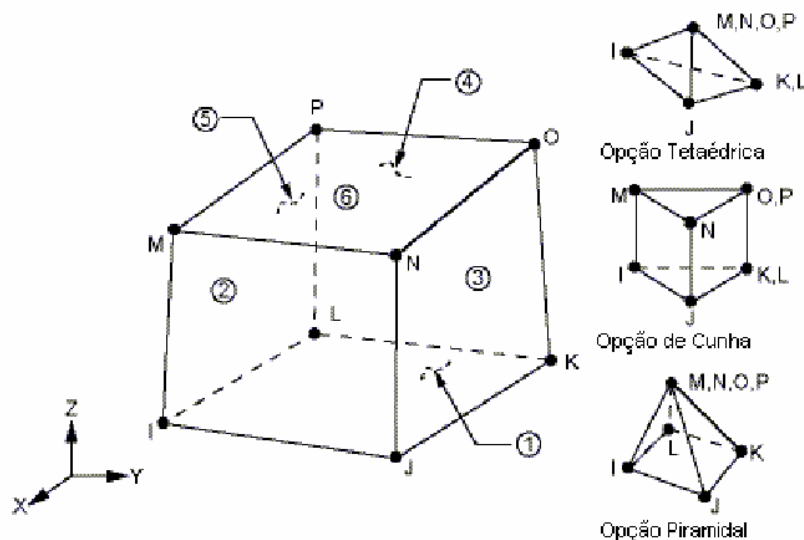


Figura 3.4 - Geometria FLUID142
Fonte: ANSYS, 2007.

3.4. Modelo Físico-Numérico

Neste estudo considera-se como modelo físico um ambiente típico de escritório com dimensões 4,7 m x 2,9 m e pé-direito de 2,8 m, Figura 3.5. As áreas das aberturas de entrada e saída do ar são iguais a 0,60 m x 0,60 m.

Uma fonte interna de calor, variando de 200 W a 1000 W, é utilizada para simular as pessoas, o sistema de iluminação e outros equipamentos existentes no interior de uma sala típica de escritório. Uma fonte interna de calor de calor de 700 W pode representar, por exemplo, um computador (300 W), iluminação (300 W) e uma pessoa (100 W) (ALLOCA et. al, 2003).

A fonte interna de calor é representada por um elemento paralelepípedo vertical e sólido com as seguintes dimensões 0,2 m x 0,4 m x 1,0 m. A fonte está centralizada em relação à largura do ambiente. Arbitrariamente é deslocada em relação ao comprimento, colocando-se mais próximo da abertura de entrada, Figura 3.5. Coloca-se a fonte a 20 cm em relação ao piso, e deste modo a altura total equivale à posição de uma mesa de trabalho. Neste trabalho não se avalia a influência da posição da fonte interna de calor.

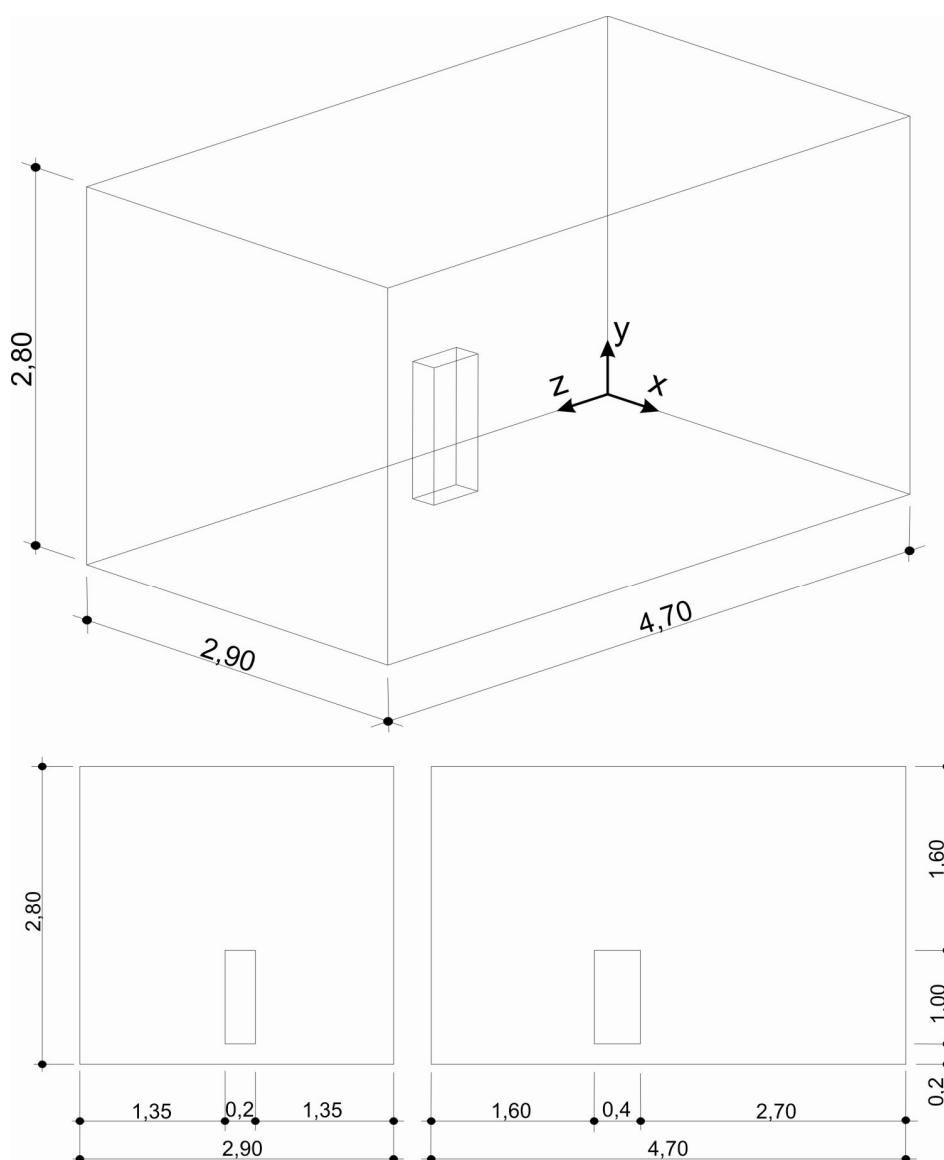


Figura 3.5 - Geometria da edificação

Considera-se o escoamento turbulento em uma cavidade aberta tridimensional de um fluido Newtoniano. O regime do escoamento é permanente e as propriedades termofísicas são constantes. As paredes laterais e o teto são considerados com temperatura conhecida e constante. O piso é considerado isolado.

Admite-se a temperatura de entrada do ar igual 25,5 °C e a temperatura nas superfícies laterais e na superfície superior igual a 30 °C.

Segundo a norma NBR 15220: 2005 a região metropolitana de Belo Horizonte, incluindo Ouro Preto, se encontram na zona bioclimática 3. Neste estudo supõe-se como temperatura de entrada do ar uma condição limite que representa a temperatura máxima durante o mês de janeiro na região metropolitana de Belo Horizonte (MORAES, 2002).

Nas simulações utiliza-se o modelo de turbulência padrão k- ϵ , pois este tem um melhor tratamento de valores médios das características do fluido. Segundo Chen (1995) em seu trabalho “Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations” mostra que nas simulações de fluxo de ar em um ambiente, o modelo de turbulência padrão k- ϵ , apresentou bons resultados, mantendo-se estáveis durante todos os casos simulados.

Na Figura 3.6 mostra-se a discretização do ambiente fluido para a situação tridimensional, utilizando-se o elemento Fluid142. Na Figura 3.7 mostra-se a vista lateral da discretização do modelo físico, pode-se verificar que as linhas horizontais e verticais apresentam 20 divisões e as aberturas de entrada e saída da ventilação tem uma malha mais densa, em decorrência do tamanho linear das aberturas serem menores em relação à geometria do ambiente.

Foram realizadas várias simulações alterando este número de divisões por linha, deixando a malha gerada no ambiente fluido, mais densa ou menos densa, chegando-se a conclusão que a configuração com 20 divisões por linha seria adequada.

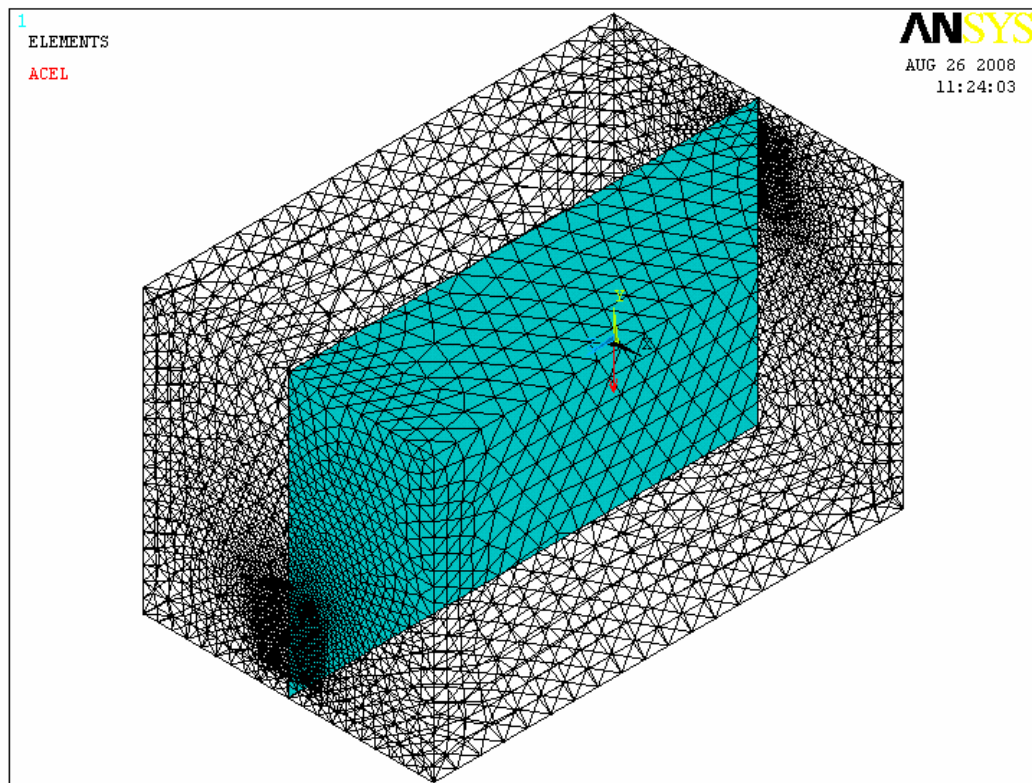


Figura 3.6 - Discretização do Modelo

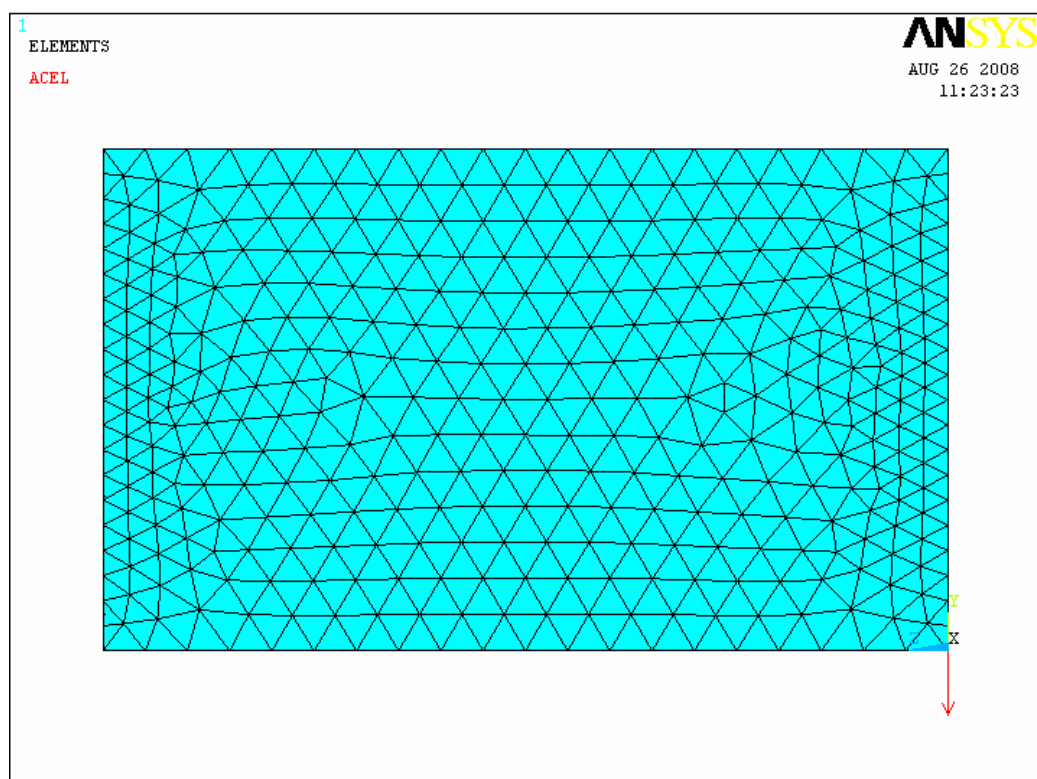


Figura 3.7 - Vista lateral da malha de elementos

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

As taxas de ventilação, obtidas via simulação numérica, são comparadas com o modelo empírico apresentado na norma BS 5925: 1991.

Para o cálculo das vazões de ar, por ação da temperatura, a condição, ΔT , deve ser conhecida. Porém, quando este valor não é conhecido em um ambiente particular, principalmente a temperatura interna T_i , que nem sempre se encontra disponível, a carga de calor total dentro do espaço, q , é alternativamente usada, Figura 4.1,

$$q = \rho.Q.C_p.\Delta T \quad (4.1)$$

resolvendo-se simultaneamente, esta equação, com àquelas para vazão de ar, dados pelo modelo empírico.



Figura 4.1 - Carga de calor total dentro do espaço (q)

No presente trabalho faz-se algumas considerações na avaliação das equações do modelo empírico, ou seja, no lugar da temperatura média, \bar{T} , considera-se a temperatura externa, T_e . Esta simplificação praticamente não altera o resultado final e a

mesma é realizada porque não se conhece a temperatura média interna do ambiente (ALLOCA *et al*, 2003).

Mostram-se os resultados, da taxa de renovação do ar por hora versus o aumento da fonte interna de calor no ambiente interno, na Figura 4.2, para comparação, no caso da ventilação unilateral. Os valores obtidos nas simulações numéricas são comparados com o modelo empírico, sugerido pela norma BS 5925: 1991 e também com os resultados apresentados por Allocca *et al* (2003).

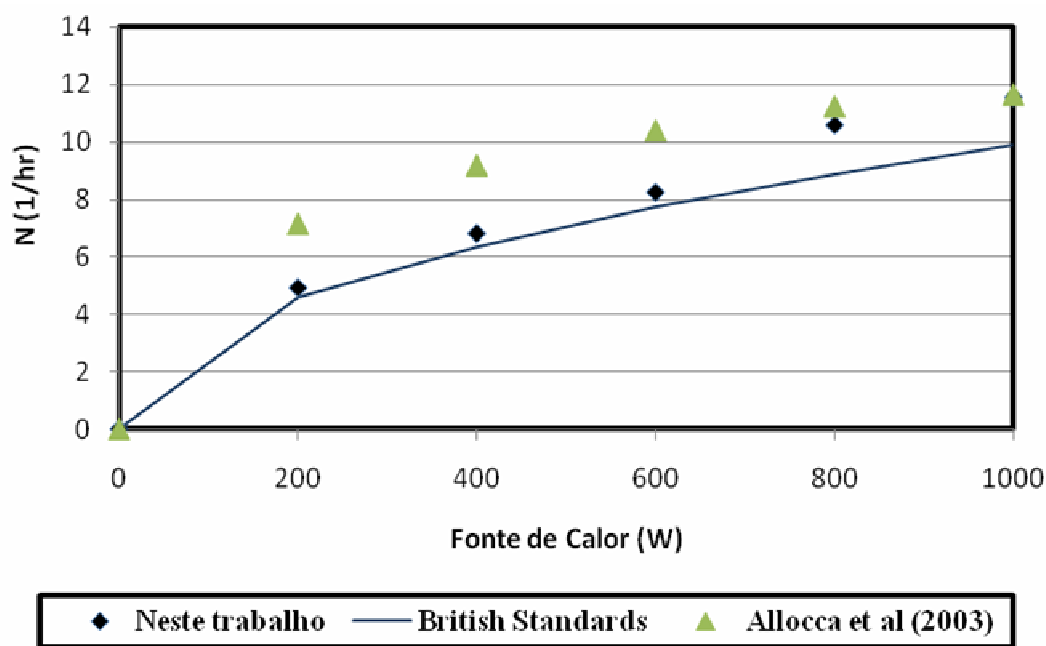


Figura 4.2 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor -ventilação unilateral

Pode-se observar que o modelo numérico encontra-se bem próximo do modelo empírico, tendo uma pequena diferença para os casos com a fonte interna de calor de 800 W e 1000 W. Entretanto, comparando com os resultados apresentados por Allocca *et al* (2003) encontra-se uma diferença de aproximadamente 10 %. Deve-se salientar que estes autores utilizam condições de contorno de parede isolada, em todas as superfícies, e neste trabalho admite-se somente a superfície inferior isolada e as demais numa temperatura conhecida.

Nas simulações numéricas, para ventilação unilateral, pode-se observar que com o aumento da fonte interna de calor aumenta-se o número de trocas de ar por hora dentro do ambiente interno da edificação, o que era de se esperar, pois a diferença de temperatura aumenta. Observa-se também que a fonte de calor interna ficou muito próxima à abertura de entrada da ventilação o que ocasionou um direcionamento da ventilação para a abertura superior e com o aumento da fonte interna de calor este direcionamento ficou mais acentuado. Desta forma a posição da fonte de calor interna deve influenciar na distribuição do ar no ambiente interno.

Na Figura 4.3 mostram-se os resultados para comparação da taxa de renovação do ar por hora versus o aumento da fonte de calor no ambiente interno para ventilação cruzada. Pode-se observar que o modelo numérico encontra-se aproximadamente 35% acima do modelo empírico. Esta diferença é dada devido ao modelo estudado ser tridimensional e o modelo empírico ser bidimensional.

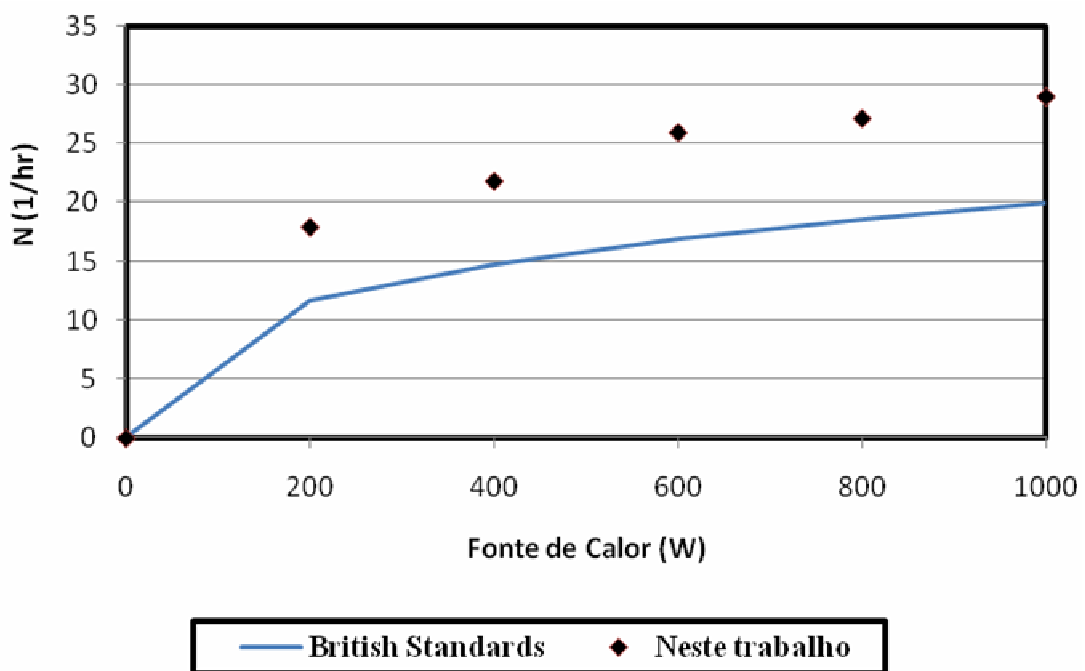


Figura 4.3 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor -ventilação cruzada

Nas simulações numéricas, para ventilação cruzada, também se pode observar que com o aumento da fonte interna de calor aumenta-se o número de trocas de ar por

hora dentro do ambiente interno da edificação. A mesma observação pode ser feita quanto à localização da fonte interna de calor, que direciona o fluxo de ar da entrada para cima, prejudicando a ventilação na parte inferior da edificação.

Na Figura 4.4 são apresentadas a taxa de renovação do ar por hora versus o aumento da fonte de calor no ambiente interno, para ventilação cruzada e unilateral. Observa-se que a taxa de renovação do ar da ventilação cruzada é de aproximadamente 3,5 vezes maior que a da ventilação unilateral, o que era de se esperar.

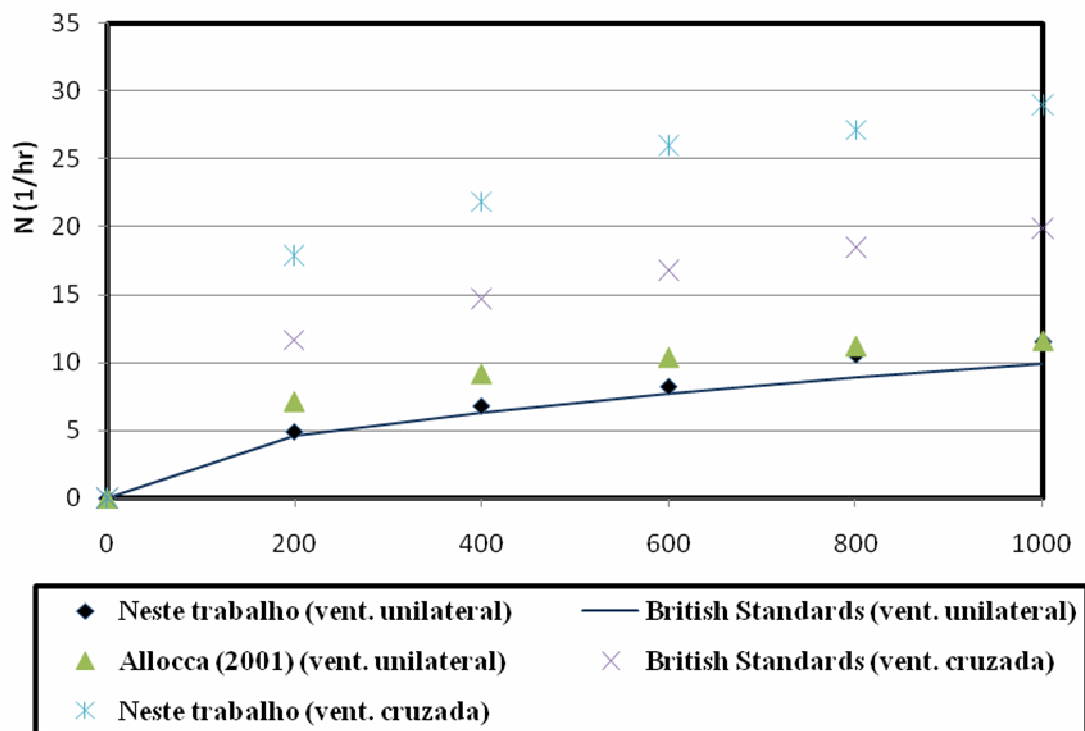


Figura 4.4 - Taxa de ventilação em função da fonte interna de calor-ventilação cruzada e unilateral

Observa-se que a ventilação unilateral não fornece adequadamente uma taxa de renovação de ar no ambiente, na mesma proporção que a ventilação cruzada, em função de ter a entrada e saída de ar na mesma fachada. Este problema é ainda mais acentuado no caso se ter ambientes com profundidade maior, uma vez que a recirculação do ar ocorre mais próximo da fachada com a abertura. Por outro lado, a ventilação cruzada geralmente proporciona uma taxa de renovação maior, pois pode tirar proveito das

pressões positivas do lado de barlavento (fachada de incidência do vento) e das pressões negativas de sotavento (fachada oposta à incidência do vento).

Para apresentação dos resultados obtidos na análise da distribuição da temperatura e do fluxo de ar no ambiente interno, considera-se um plano passando no centro longitudinal da edificação, conforme mostrado na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

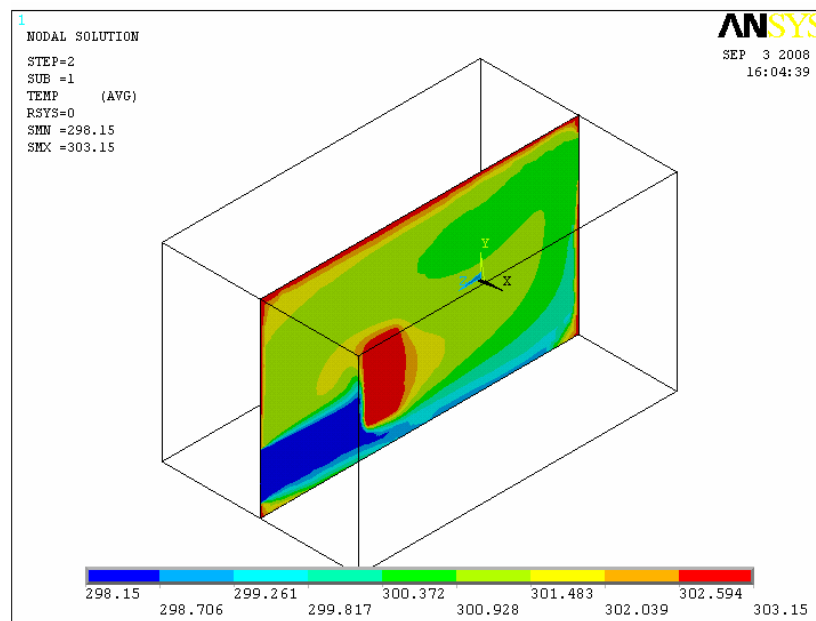


Figura 4.5 - Plano onde serão feitas as análises das simulações

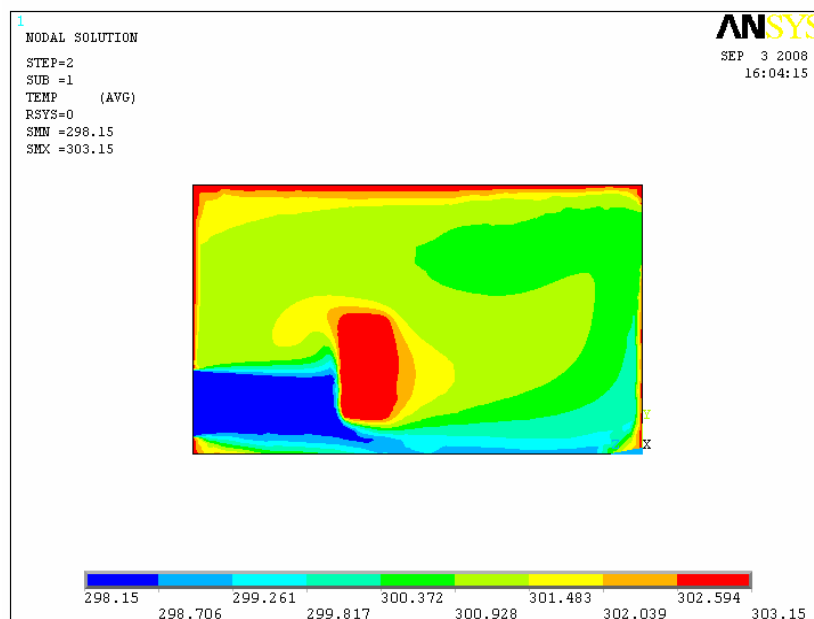


Figura 4.6 - Plano longitudinal

4.1. Ventilação Unilateral

Na avaliação numérica da ventilação unilateral, Figura 4.7, são derivados os campos de distribuição de temperatura e distribuição de velocidade do ar interno, Figuras 4.8 a 4.17. O tempo computacional para cada modelo numérico simulado é de aproximadamente três horas, para um número de iterações da ordem de 200.

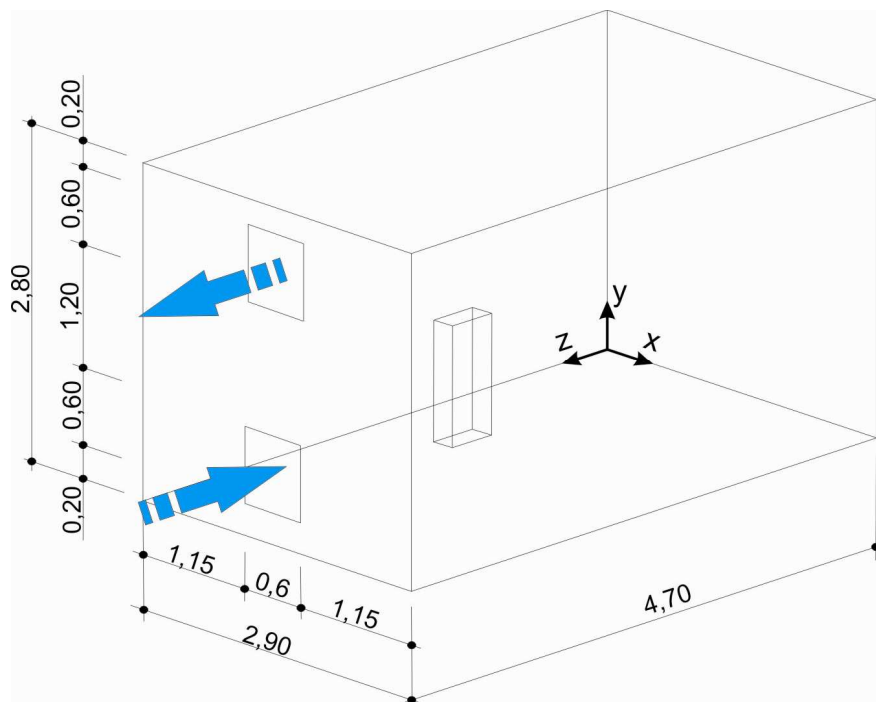


Figura 4.7 - Disposição das aberturas de entrada e saída da ventilação unilateral

Segundo a norma ASHRAE 55: 2004 para um ambiente ventilado naturalmente pode-se admitir como temperatura máxima de conforto um valor de até 28 °C, para uma faixa de velocidade entre 0,25 m/s a 0,8 m/s.

Nas Figuras 4.8 a 4.12 apresenta-se a influência da fonte interna de calor para o caso da ventilação unilateral, admitindo uma velocidade média de entrada do ar de 0,4 m/s.

Observa-se pelos resultados mostrados na Figura 4.8 que a fonte interna direciona o fluxo de calor para cima, gerando uma estratificação acentuada no perfil de temperatura interna. Deste modo pode-se concluir que a posição da fonte interna de calor no ambiente tem influência na distribuição da temperatura interna.

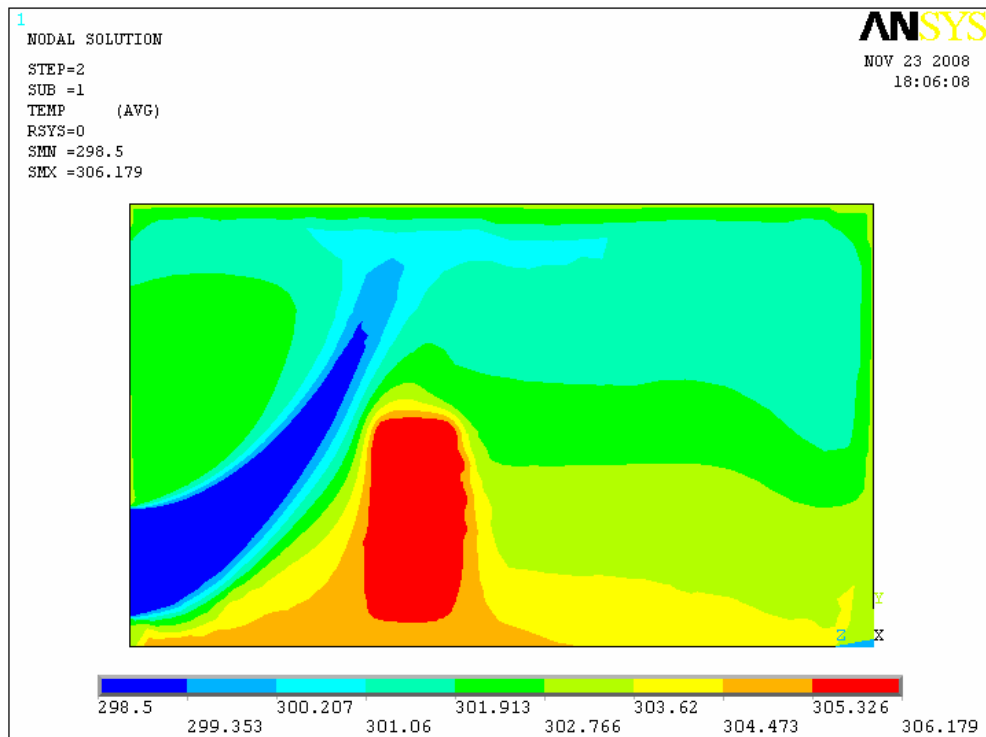


Figura 4.8 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 200 W

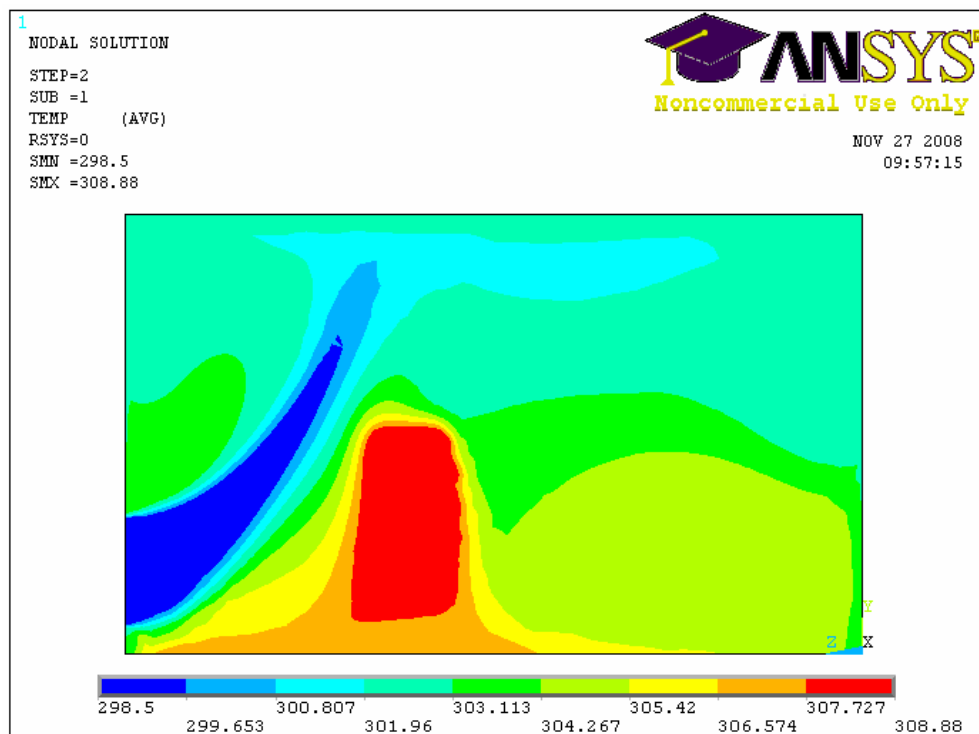


Figura 4.9 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 400 W

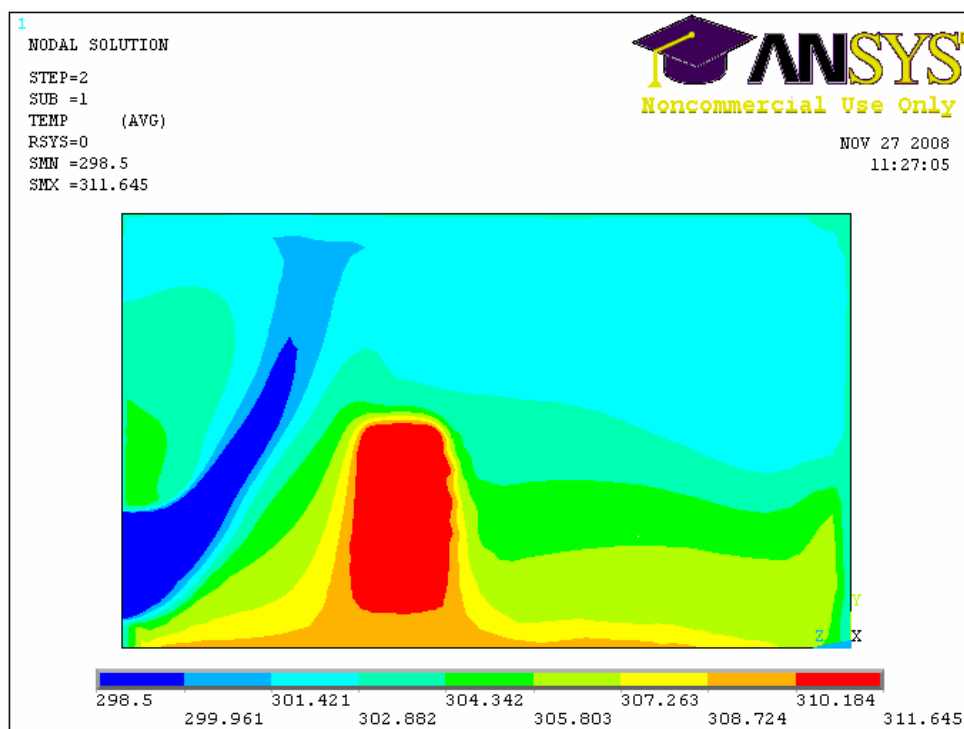


Figura 4.10 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 600 W

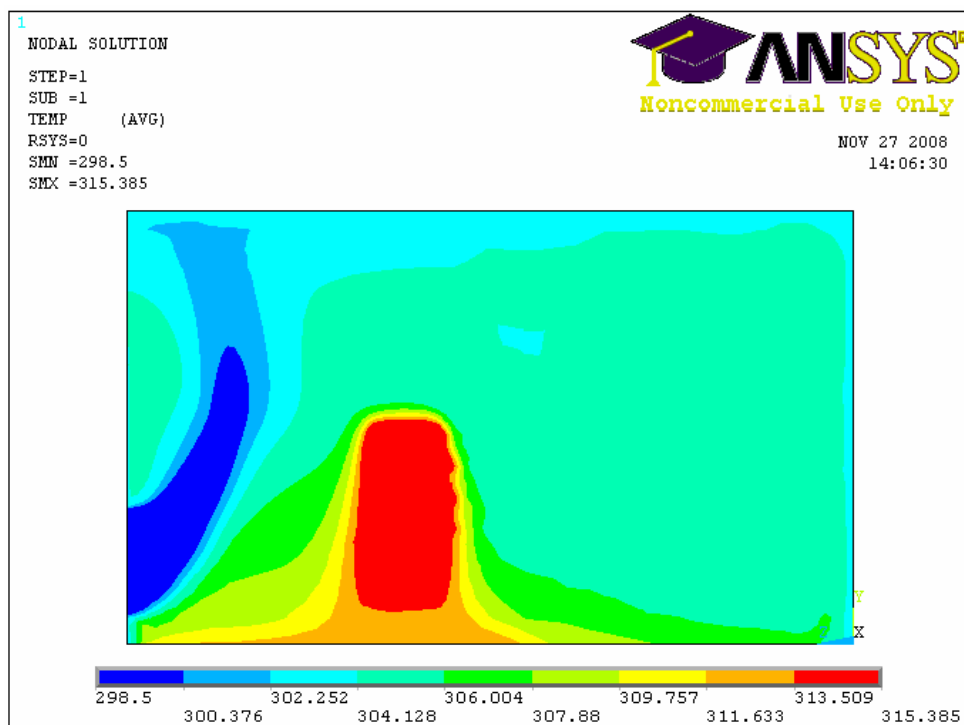


Figura 4.11 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 800 W

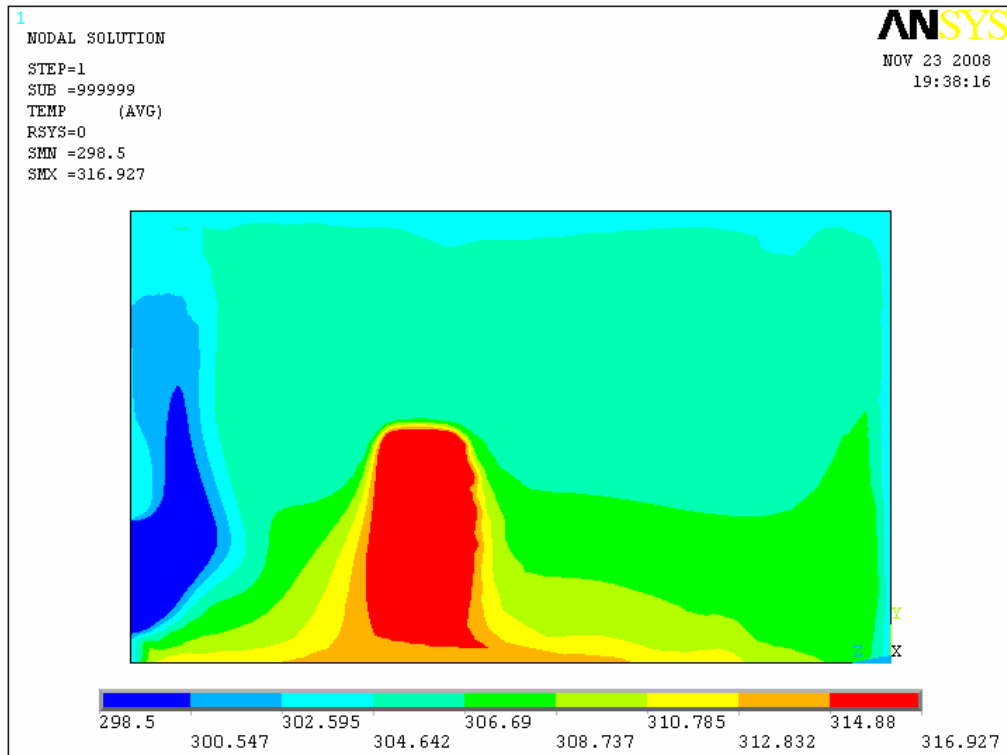


Figura 4.12 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 1000 W

A fonte interna de calor influencia fortemente a temperatura do ar na sua vizinhança, modificando o seu perfil e alterando também a recirculação do ar (Figuras 4.13 a 4.17). Dependendo da profundidade do ambiente, resultam grandes regiões de ar estagnado na parte posterior da fonte e conseqüentemente temperaturas mais elevadas. Aumentando-se a fonte de calor, nota-se uma modificação geral no perfil de temperatura interna e também nota-se que o fluxo de ar é empurrado para a abertura superior, elevando a circulação de ar na região superior do ambiente.

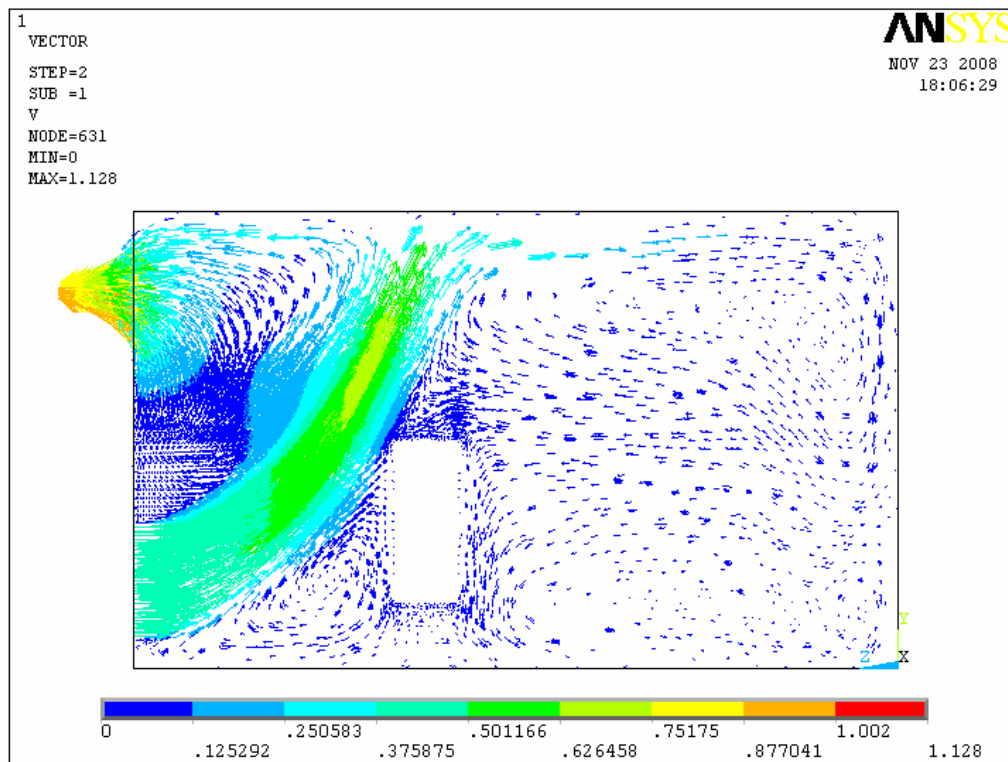


Figura 4.13 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 200 W

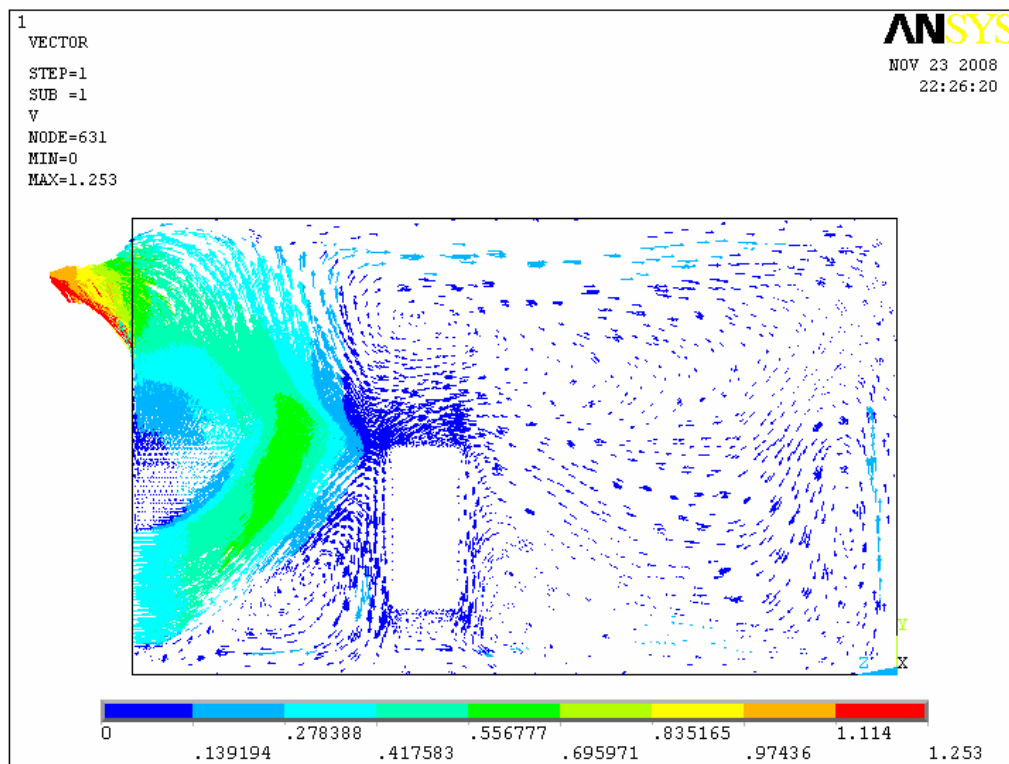


Figura 4.14 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 400 W

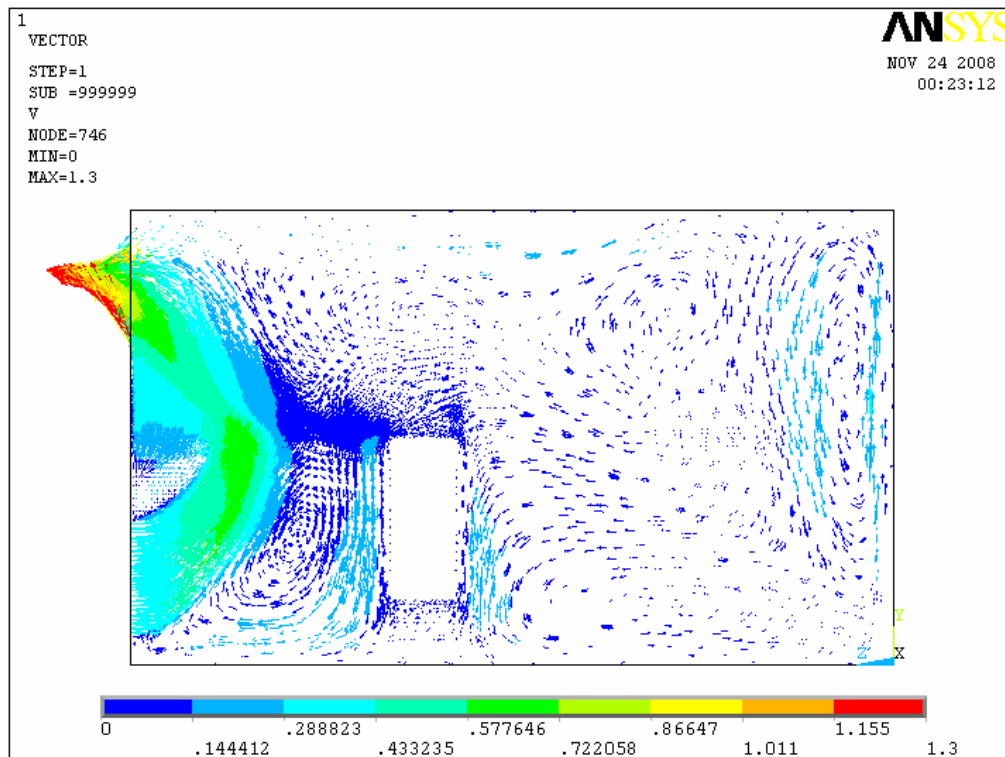


Figura 4.15 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 600 W

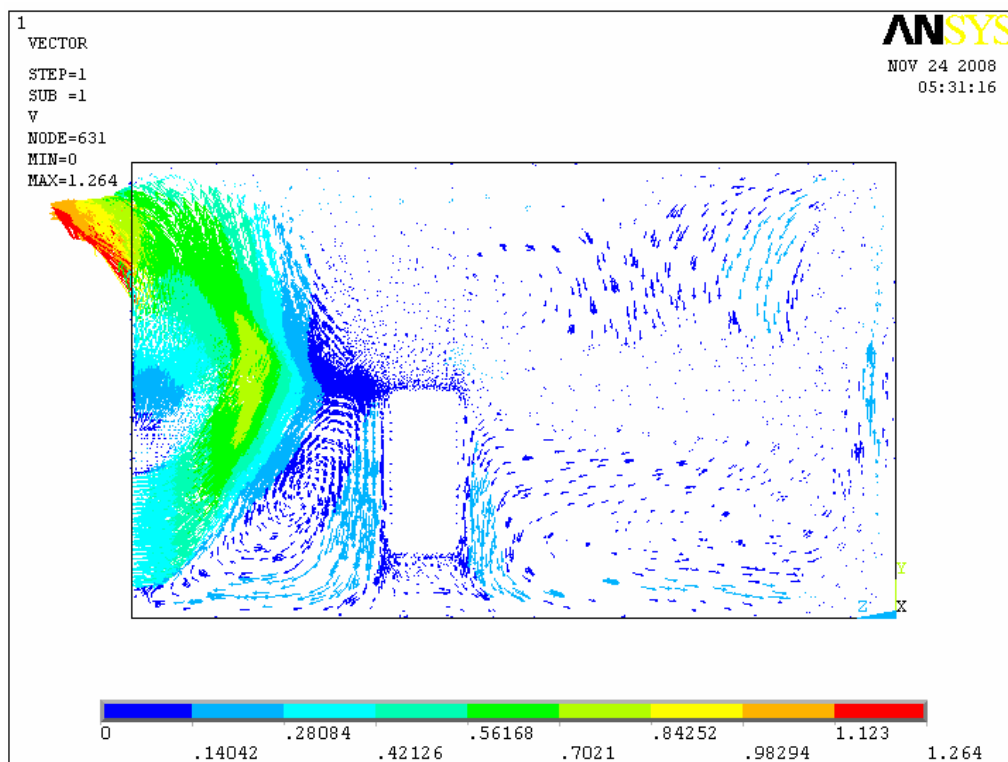


Figura 4.16 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 800 W

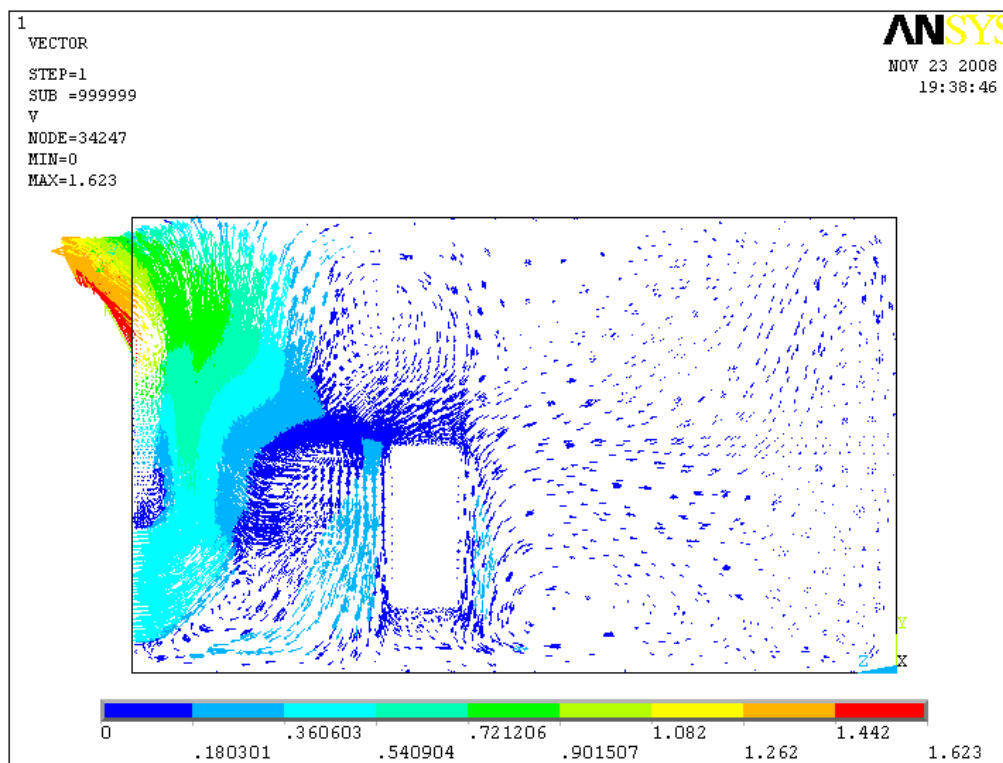


Figura 4.17 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 1000 W

Na distribuição do fluxo de ar interno verifica-se uma maior recirculação de ar na região anterior a fonte de interna de calor. Pode-se neste caso, dependendo da velocidade de entrada do ar, ter regiões posteriores a fonte com temperaturas mais elevadas e neste caso a condição de conforto, temperatura máxima de 28 °C, não ser alcançada.

4.2. Ventilação Cruzada

Na Figura 4.18 apresenta-se o modelo físico para o processo de ventilação cruzada. Nas Figuras 4.19 a 4.28 apresentam-se os campos de distribuição de temperatura e distribuição de velocidade do ar interno.

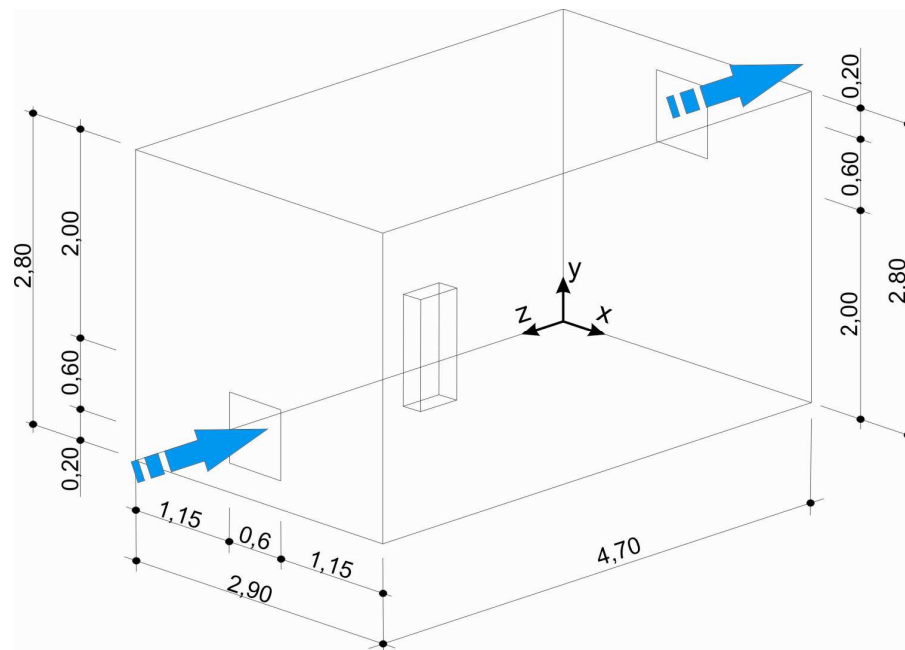


Figura 4.18 – Disposição das aberturas de entrada e saída da ventilação cruzada

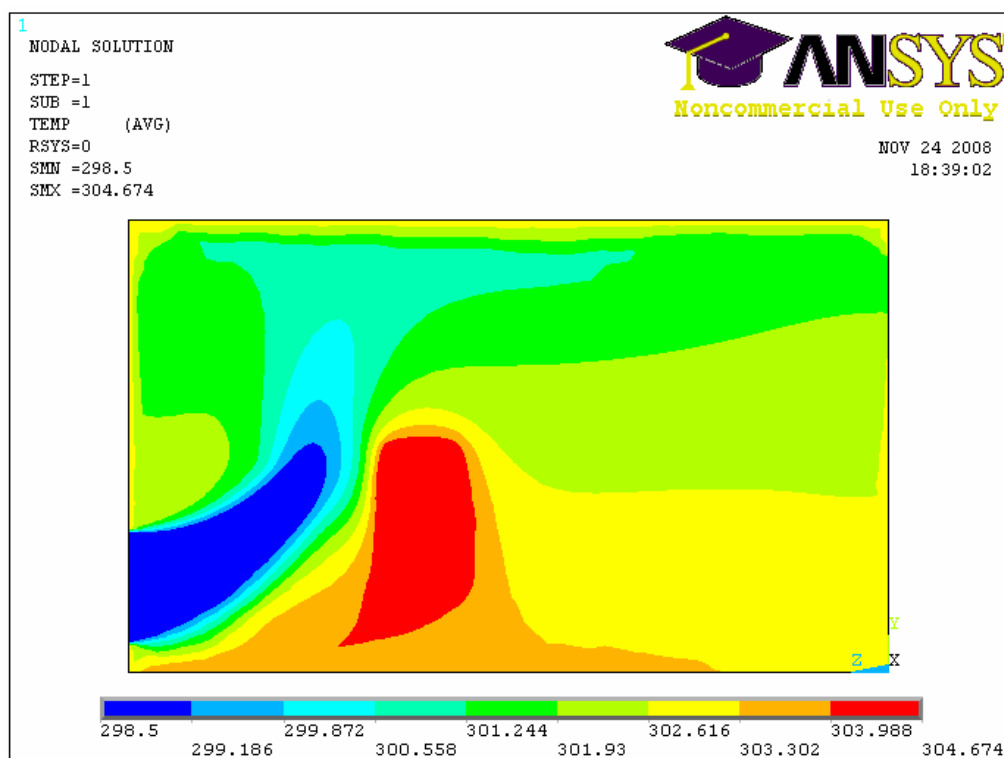


Figura 4.19 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 200 W

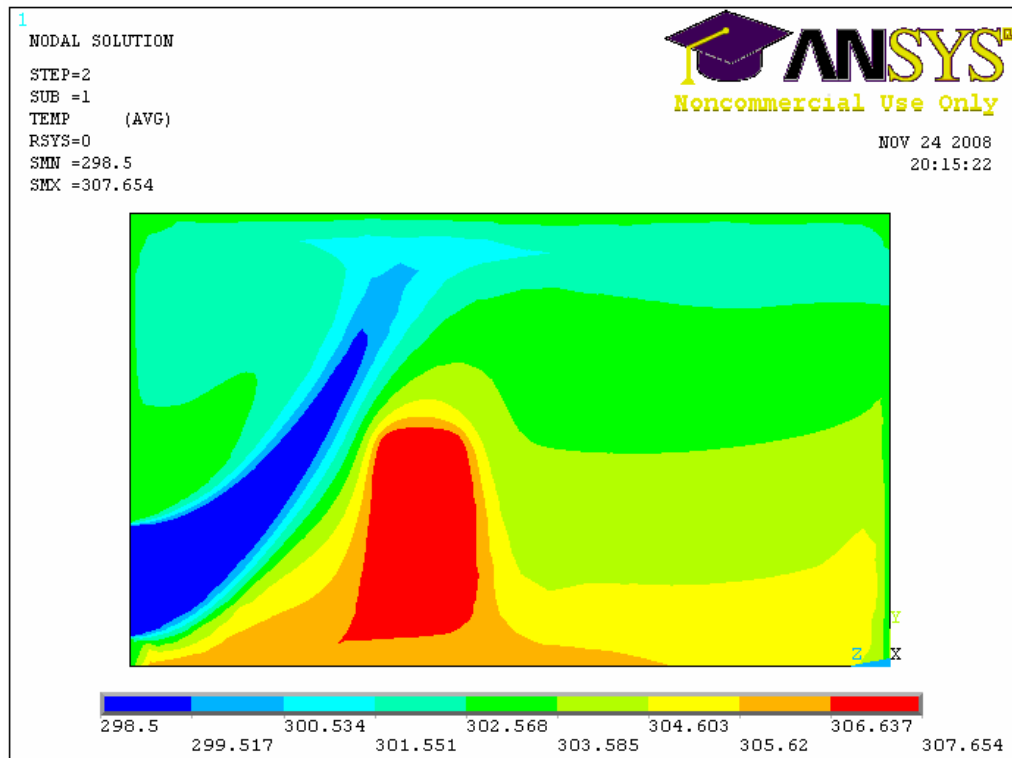


Figura 4.20 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 400 W

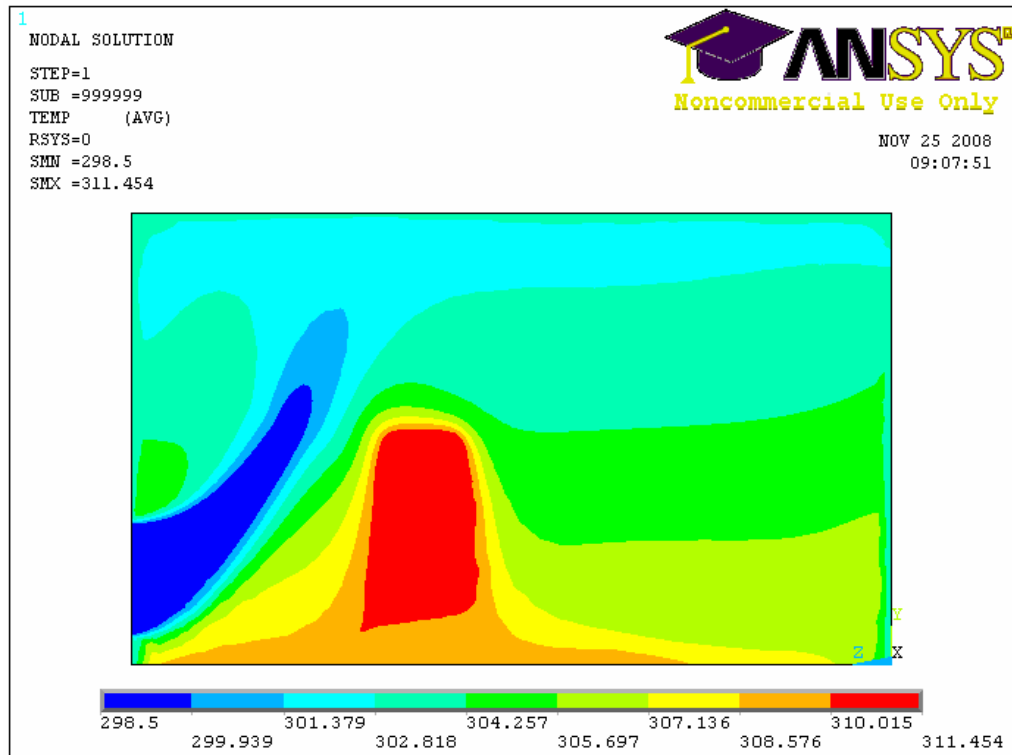


Figura 4.21 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 600 W

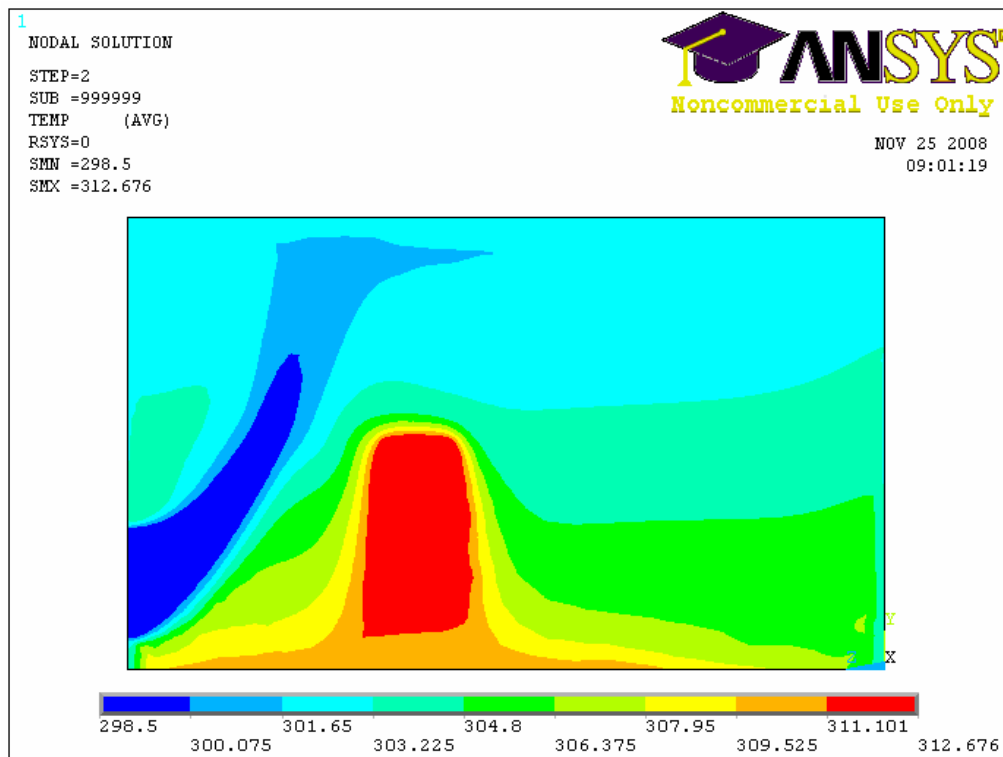


Figura 4.22 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 800 W

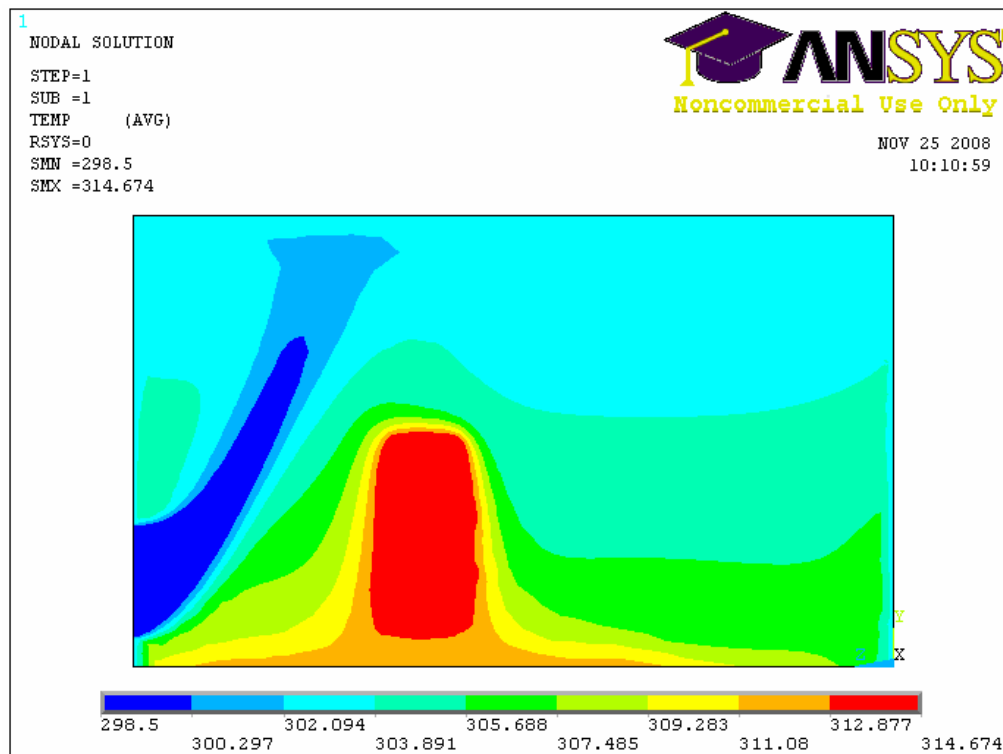


Figura 4.23 - Perfil da temperatura, considerando uma fonte de calor de 1000 W

Da mesma forma que ocorre para o modelo de ventilação unilateral a fonte interna também redireciona o fluxo de ar para as regiões superiores do ambiente. Como no caso da ventilação cruzada a abertura de saída está na fachada oposta este redirecionamento do fluxo de ar, ocasionado pela fonte, altera mais acentuadamente o perfil de temperatura interna com o aumento da fonte. Neste caso ocorrem também regiões de recirculação do ar, posterior a fonte interna, diminuindo a temperatura. Desta forma, dependendo da velocidade de entrada do ar, as condições internas de conforto são mais facilmente alcançadas.

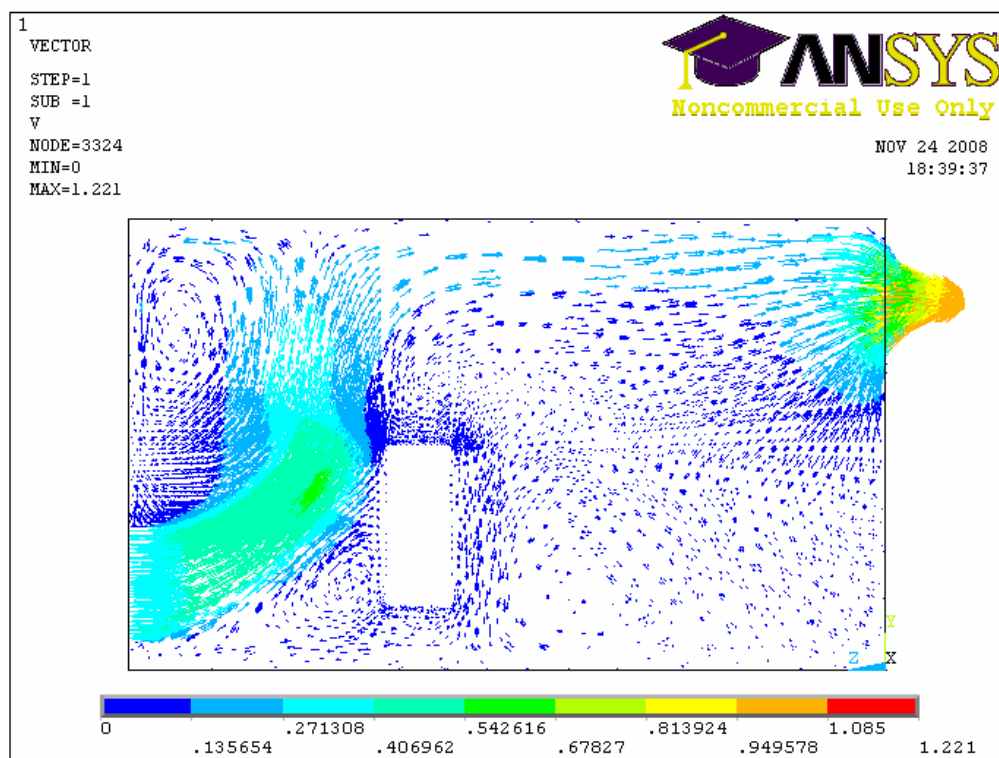


Figura 4.24 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 200 W

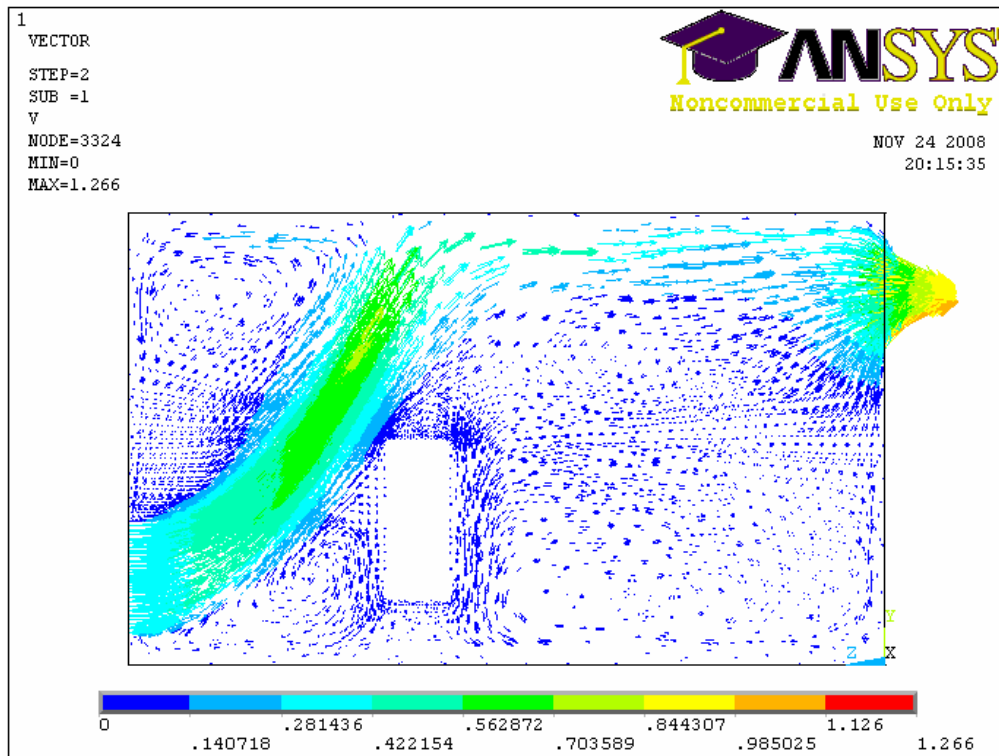


Figura 4.25 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 400 W

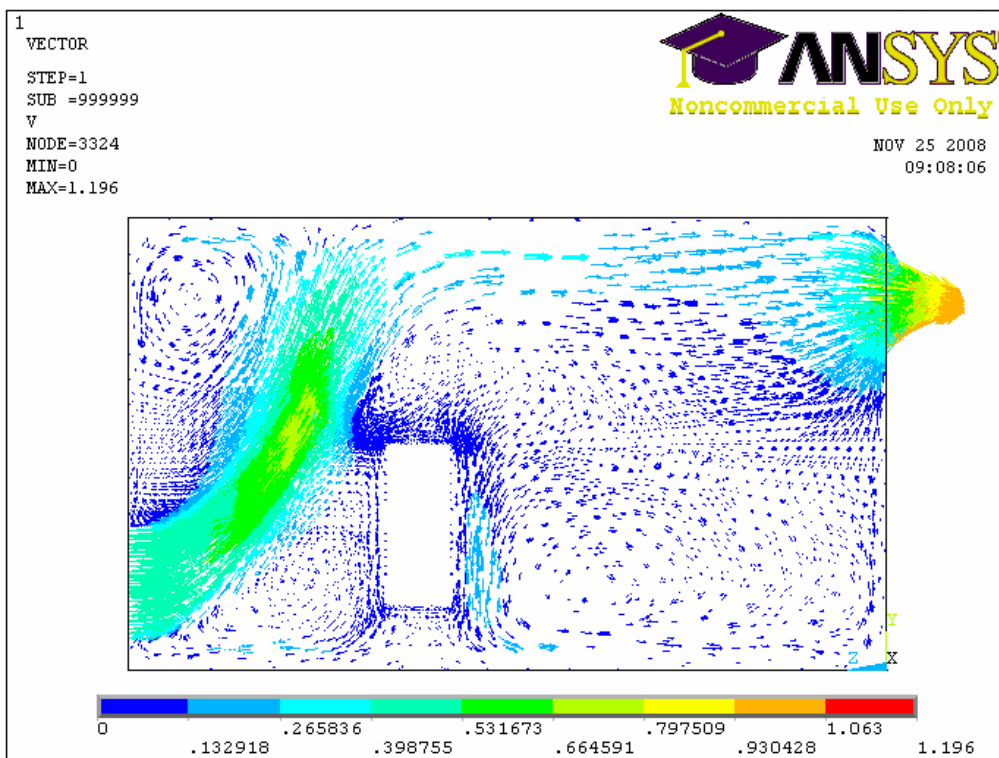


Figura 4.26 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 600 W

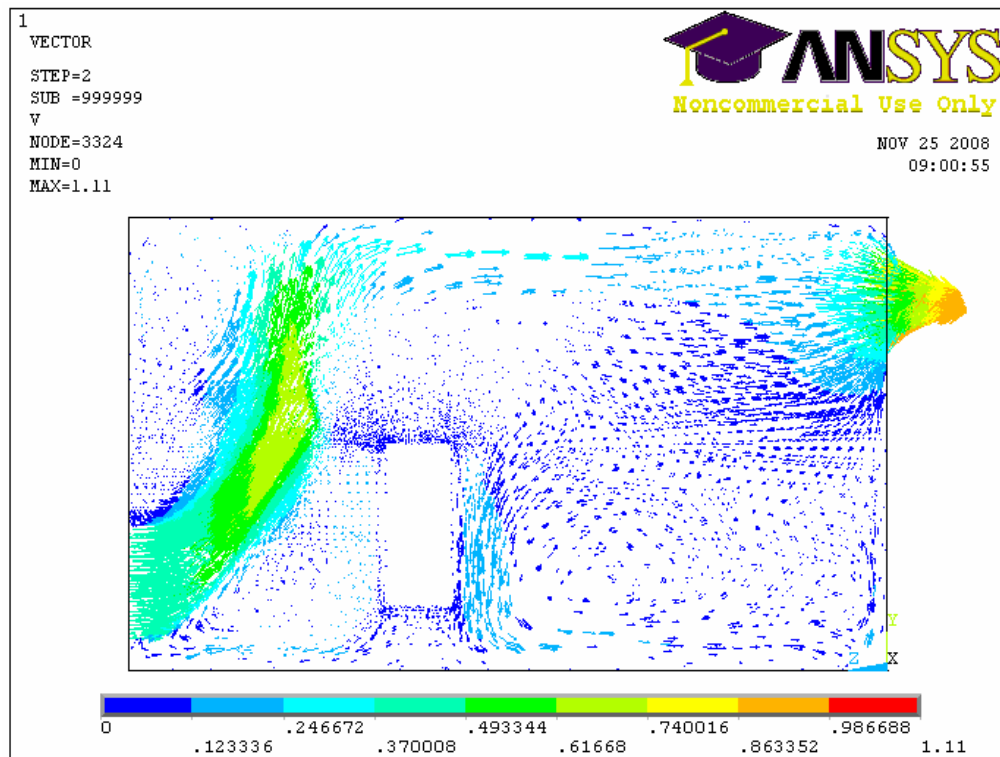


Figura 4.27 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 800 W

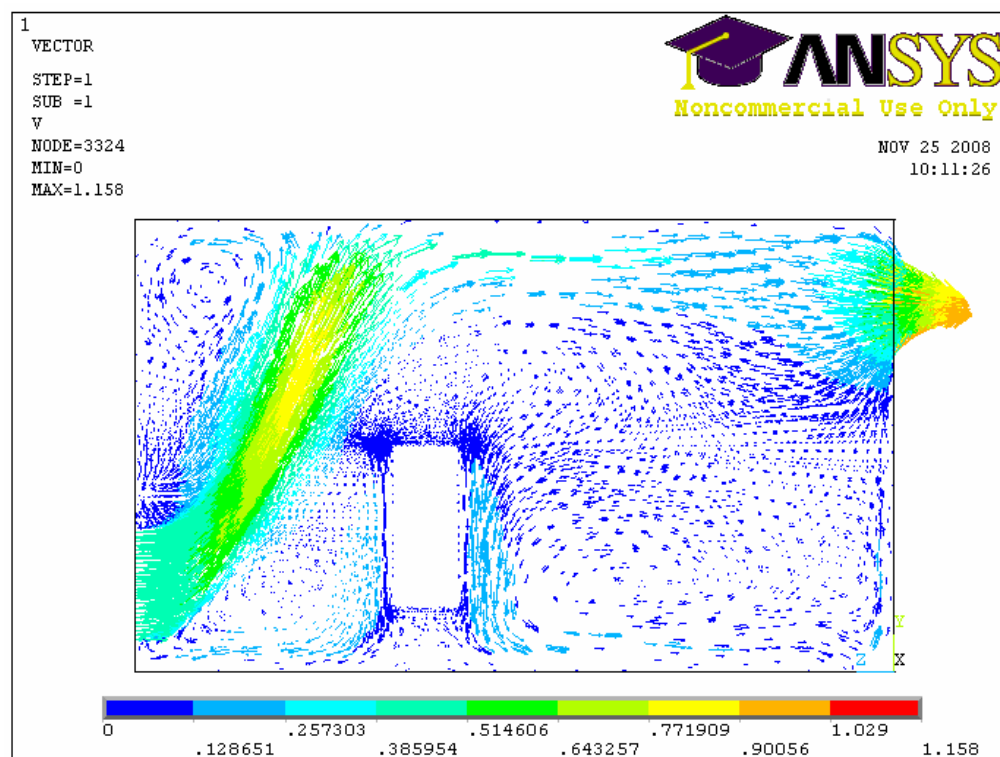


Figura 4.28 - Perfil da velocidade do ar, considerando fonte de calor de 1000 W

Observa-se que no caso do modelo de ventilação cruzada, com o aumento da fonte interna de calor tem-se uma recirculação mais acentuada do ar vizinho, diminuindo as porções de ar estagnado, resultando numa maior eficiência do processo de ventilação, independentemente da profundidade do ambiente.

No entanto, deve-se observar que para o caso de fontes internas de calor elevadas e uma maior recirculação do ar interno, a influência da fonte, pode levar a uma condição de desconforto térmico interno, causado pela elevação da temperatura interna para condições climáticas externas, com temperatura do ar acima de 28 °C, condição limite de temperatura de conforto estabelecida por norma ASHRAE 55:2004.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A utilização da ventilação natural como estratégica arquitetônica e bioclimática é importante e um projeto adequado de ventilação natural deve ser avaliado em detalhes observando-se as condições climáticas e condições de vento locais para se ter ótimos resultados. No entanto, em função da complexidade das condições de contorno e da imprevisibilidade das forças naturais é muito difícil se definir corretamente as condições de velocidade e direção do vento, pois se trata de forças variáveis que não se pode controlar como na ventilação mecânica.

Nesse contexto a simulação numérica se torna uma ferramenta potente, pois permite que se possa avaliar a influência das forças naturais (vento). Todavia, cuidados devem ser tomados na definição correta das condições de contorno, que nem sempre é uma tarefa fácil.

No presente trabalho verifica-se a influência das fontes internas de calor existentes num ambiente interno típico de escritório com intuito de se comparar o efeito da mesma na taxa de renovação do ar, tanto para ventilação unilateral, quanto para a cruzada. De acordo com as comparações realizadas entre o modelo empírico, sugerido pela norma Britânica BS 5925: 1991, e o modelo da simulação numérica, via programa ANSYS (2007), observa-se que o aumento da fonte interna de calor influencia diretamente a taxa de recirculação do ar interno, mostrando uma maior eficiência para o modelo de ventilação cruzada.

Baseado nos resultados do modelo empírico, apresentado pela norma BS 5925:1991, e os resultados obtidos por meio do modelo numérico, aqui utilizado,

encontra-se resultados bastante próximos, o que revela um desempenho satisfatório do modelo numérico utilizado.

No caso do modelo de ventilação cruzada, os resultados obtidos neste trabalho são superiores em torno de 35 % em relação aos resultados obtidos por meio do modelo empírico. Tem-se neste caso uma valorização das taxas de fluxo de ar. Esta diferença entre os resultados obtidos pelos dois modelos pode ser pelo fato do modelo numérico estudado ser tridimensional enquanto o modelo empírico ser bidimensional.

Com os resultados mostrados, observa-se que a localização da fonte interna de calor pode influenciar no perfil de velocidade do ar dentro do ambiente e conseqüentemente no perfil de temperatura. Neste trabalho não se analisa a influência da posição da fonte interna de calor durante o processo de simulação numérica da ventilação no ambiente.

Fundamentado nos resultados do presente trabalho pode-se dizer que a simulação numérica é uma ferramenta apropriada para o estudo e concepção de ventilação natural em edificações.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Esta pesquisa dá origem a algumas indagações de importância que merecem um esforço continuado neste estudo, como por exemplo:

- avaliar a influência da localização da fonte interna de calor dentro do ambiente;
- avaliar a influência do número, localização e tamanho das aberturas existentes no projeto;
- realizar este estudo utilizando um volume de controle que envolva a edificação, aplicando como condição de contorno a velocidade meteorológica.

REFERÊNCIAS

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

ALLARD, F. (Ed.) **Natural Ventilation in Buildings – A Design Handbook**. James & James Ltd. 356 p. 1998.

ANSYS Multiphysics 11.0. ANSYS Release 11.0 Documentation: ANSYS Inc. Theory Reference. United States: SAS IP, Inc., 2007.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal environmental conditions for human occupancy**: ANSI/ASHRAE 55. Atlanta, 26p. 2004.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Ventilation for acceptable indoor air quality**: ASHRAE 62. Atlanta, 44 p. 2004.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Fundamental Handbook**. Ch. 22. Natural ventilation and infiltration, Atlanta, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho térmico de edificações – Parte 3. Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**: NBR 15220- 3. Rio de Janeiro, 30 p, 2005.

AYNSLEY, R.M.; MELBOURN W.; VICKERY B.J. **Architectural Aerodynamics**. Applied Science Publishers, London, 1977.

BITTENCOURT, L.S. **Ventilation as a cooling resource for warm humid climates: a investigation on the influence of geometric aspects of perforated block walls to improve ventilation inside low-rise buildings**. 1993. Thesis (Architectural Association Graduate School), London, 1993.

BITTENCOURT, L.S.; CÂNDIDO, C. M. **Introdução à Ventilação Natural**. 2a. ed. Maceió: EDUFAL, 2006. v.1. 163 p.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (Brasil). **Balanco Energético Nacional**. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 mai. 2007.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation**: BS 5925. London, 1980.

CHEN, Q. Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations. **Numerical Heat Transfer - Part B**, 1995, v. 28, p. 353-69.

CLEZAR, C. A. NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação industrial**. Editora da UFSC, Florianópolis, 1999, 288p.

COSTA, E.C. **Ventilação**. São Paulo: Edgard Blücher. 2005, 256 p.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT. **Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide – Methodologie de prise en compte des parametres climatiques dans l'habitat et conseils pratiques. Tome 1**: CSTB 4. Paris, 1982.

DE GIDDS, W.; PHAFF H.. Ventilation Rates and Energy Consumption due to Open Windows. **Air Infiltration Review**, v..4, n. 1 p. 4-5, 1982.

EFTEKHARI, M. M.; MARJANOVIC, L. D.; PINNOCK, D. J. Air flow distribution in and around a single-sided naturally ventilated room. **Building and Environment**, London, v. 38, p. 389-397, 2001.

ENVIRONMENTAL Design-Guide A. Chartered Institute of Building Services Engineers, CIBSE, UK, 1999.

ETHERIDGE, D.; SANDBERG, M. **Buildings Ventilation: Theory and Measurement**. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1996.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering**. United States: McGraw-Hill Book Company, 1972.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. Studio Nobel, 5ª Edição, São Paulo, SP, 19 p, 2001.

GIVONI, B. **Climate conservative in buldings and urban design**. New York: John Wiley e sons, 1998.

GIVONNI, B. **L'Homme, l'Architecture et le Climat**. Eyrolles, Paris (French Edition), 1978.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81 out./dez. 2006.

HERNANDEZ, A. et al. Análise da Ventilação Natural em Ambientes não Condicionados. In: NUTAU, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1 CD-Rom.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2000-Características da População e dos Domicílios. Resultados do Universo**. Brasil, 2001

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STARDARDIZATION. **Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort: ISO 7730**. Geneva, 2006.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R; TRIANA, M.A. **Relatório Estado da Arte. Capítulo Energia. 2005. Projeto Tecnologias para a Construção Habitacional mais Sustentável**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/finep>). Acesso em: out. 2008.

LETAN, R. et al. Passive ventilation and heating by natural convection in a multi-storey building. **Building and Environment**. n. 36, p. 1-12, 2001.

MACIEL, A.A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico**. 2006. 197p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

- MARTIN, A.; FITZSIMMONS, J. Making Natural Ventilation Work: guidance note GN 7. Bracknell, 2000. Disponível em: <<http://www.bsria.co.uk/bookshop/system/index.html>>. Acesso em: 2005.
- NEVES, L.D.O. A arquitetura de Severiano Porto sob enfoque bioclimático: ventilação natural no campus da Universidade do Amazonas, Manaus- AM. In: ENTAC, 11, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC. 2006.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO. Edificações – Norma Regulamentadora 8: NR 8. Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO. Programa de Prevenção de Riscos Ambientais – Norma Regulamentadora 9: NR 9. Portaria GM nº 3.214, de 08 de junho de 1978.
- MORAES, J. A. P. . **A mudança climática de Belo Horizonte em perspectiva global.** Cadernos de Geografia, Belo Horizonte, v. 12, n. 18, p. 15-24, 2002.
- OLGYAY, V. **Arquitectura Y Clima.** Gustavo Gilli, Espanha. 203 p. 1998
- PINTO, M.; SILVA, F.M.. FREITAS, V.P. Modelos Preditvos para Ventilação Natural. **Construção Magazine**, n. 14, 3º tri., 2005.
- PROCEL. Programa nacional de conservação de energia elétrica. **Canal do consumidor. Consumo de eletrodomésticos.** Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/procel/>>. Acesso em: nov. 2006.
- ROCHA, L.J.C; SOUZA, H.A. The Influence of internal thermal load in naturally ventilated buildings. Iberian Latin American Congress on Computational methods in Engineering. **Proceedings of CILAMCE`2008**, No. 29, Maceió, AL, Brazil, Nov. 2008.
- ROMERO, M. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano.** Projeto Editores Associados, São Paulo. 28 p. 1988.
- SANTAMOURIS, M., et al. **Natural ventilation in buildings: a design handbook.** London, UK: James & James (Science Publishers) Ltd. 356 p. 1998.
- SCIGLIANO, S. e HOLLO, V. **IVN – Índice de ventilação natural.** Pini, São Paulo. ISBN 85-7266-135-2, 279 p. 2001

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

TOLEDO, E. **Ventilação natural das edificações**. Editora da Universidade Federal de Alagoas – EDUFAL, Maceió, AL. 170 p. 1999.

TRINDADE, S.C. **Simulação computacional como ferramenta de auxílio a projeto: Aplicação em edifícios naturalmente ventilados no clima de Natal/RN**. 2006. 136 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Feral do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

ANEXO A

MODELOS EMPÍRICOS PARA O FLUXO DE AR

A.1 Método da ASHRAE

O Método ASHRAE (1985) requer conhecimento da área efetiva total de infiltração de uma edificação, a qual pode ser determinada utilizando-se técnicas de pressurização/despressurização ou determinadas em tabelas. De acordo com o método, a taxa de fluxo de ar, Q , em uma única zona da edificação é:

$$Q = A\sqrt{a.\Delta T + b.U_{met}^2} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{A.1})$$

onde, A é a área total efetiva de infiltração na edificação (cm^2), a é o coeficiente de chaminé ($\text{m}^6 / \text{h}^2 \text{ cm}^4 \text{ K}$), b é o coeficiente de vento ($\text{m}^4 \text{ s}^2 / \text{h}^2 \text{ cm}^4$), Δt é a diferença de temperatura média interna e externa (K), U_{met} é a velocidade do vento meteorológica (m/s).

O coeficiente a tem três valores diferentes conforme o número de andares da edificação, que são:

$a = 0,00188$ para edificações com um andar;

$a = 0,00376$ para edificações com dois andares;

$a = 0,00564$ para edificações com três andares.

O coeficiente b tem valores diferentes conforme o número de andares da edificação, mas também conforme a classe de proteção local para a qual a edificação corresponde. Valores do coeficiente b são dados na Tabela A.1 para cinco tipos diferentes de classes de proteção:

Tabela A.1 - Coeficientes b para várias alturas de edificação e classes de proteção local

Classes de Proteção	Número de andares		
	1	2	3
Sem obstruções	0,00413	0,00544	0,00640
Proteção local leve	0,00319	0,00421	0,00495
Proteção moderada	0,00226	0,00299	0,00351
Proteção pesada	0,00135	0,00178	0,00209
Proteção muito pesada	0,00041	0,00054	0,00063

A.2 Método de Aynsley

Aynsley (1977) sugere um método simples para predição de fluxo de ar global no caso de ventilação cruzada. Assumindo duas aberturas principais nas duas fachadas opostas de uma edificação, o método utiliza a definição de coeficiente de pressão C_{p1} e C_{p2} em cada fachada para calcular a taxa de fluxo de ar pela edificação. Impondo conservação de massa entre as duas aberturas, a seguinte expressão é derivada para a taxa de fluxo global:

$$Q = \sqrt{\frac{C_{p1} - C_{p2}}{\frac{1}{A_1^2 C_{d1}^2} + \frac{1}{A_2^2 C_{d2}^2}}} \cdot v_z \quad (\text{A.2})$$

onde C_{d1} e C_{d2} são os coeficientes de descarga, dados como funções da configuração de abertura, A_1 e A_2 são as áreas de aberturas 1 e 2 respectivamente e v_z é a velocidade do vento de referencia.

A.3 Método de De Gidds and Phaff

De acordo com o Método de De Gidds e Phaff (1982), uma expressão geral é dada para o cálculo da taxa de ventilação, Q , por uma janela aberta em função da diferença de temperatura, velocidade do vento e o efeito combinado dos dois. Para o caso de ventilação unilateral, uma velocidade efetiva, U_{ef} é definida e refere-se ao fluxo no meio da abertura da janela. Em uma forma geral a velocidade efetiva é dada como:

$$U_{ef} = \frac{Q}{A/2} = \sqrt{\frac{2}{g} (\Delta p_{vento} + \Delta p_{chaminé} + \Delta p_{turb})} \quad (A.3)$$

conduzindo à forma:

$$U_{ef} = \frac{Q}{A/2} = \sqrt{C_1 U_{met}^2 + C_2 H \Delta T + C_3} \quad (A.4)$$

onde U_{met} é a velocidade do vento meteorológica, H é o tamanho vertical da abertura, C_1 é um coeficiente adimensional dependente do vento, C_2 é uma constante de contorno e C_3 é um constante de turbulência. O termo C_3 é equivalente para uma pressão de turbulência efetiva que provê ventilação na ausência do efeito de chaminé ou vento permanente. Comparação entre valores medidos e calculados conduziu aos seguintes valores para os parâmetros apropriados: $C_1 = 0,001$, $C_2 = 0,0035$, $C_3 = 0,01$.

A.4 Método de Givoni

O Método proposto por Givoni (1978) é baseado em informações experimentais que calcula a velocidade média do ar interno para ambientes de planta quadrada com aberturas idênticas localizadas em paredes opostas. De acordo com esse método, a velocidade média dentro de um ambiente é dada pela seguinte expressão:

$$V_i = 0,45.(1 - e^{-3,48x}).V_r \quad (\text{A.5})$$

na qual V_i é a velocidade média interna, x é a razão entre a área de abertura e a área de parede onde se localiza, e V_r é a velocidade do vento externo de referência.

A.5 Método CSTB

O C.S.T.B. (Centre Scientifique et Technique du Batiment de Paris) propõe uma metodologia baseada em dados obtidos na simulação em túnel de vento para a predição do movimento de ar em recinto fechado por vento-induzido. O método é baseado na avaliação de um “Coeficiente de Avaliação Global, C_G , definido como sendo a razão entre a velocidade do ar interno, V , a uma altura de 1,5 m, e a velocidade do ar externo à mesma altura. Este coeficiente depende diretamente de:

- Características do local;
- Orientação da edificação e do vento;
- Características exteriores da edificação;
- Arquitetura interior e aerodinâmica interior da edificação.

O método propõe a avaliação de quatro coeficientes correspondentes, C_{local} , $C_{\text{orientação}}$, $C_{\text{arq. ext.}}$, $C_{\text{aero int.}}$. O coeficiente global é igual ao menor dos quatro coeficientes:

$$C_G = \min (C_{\text{local}}, C_{\text{orientação}}, C_{\text{arq. ext.}}, C_{\text{aero int.}}) \quad (\text{A.6})$$

Para a avaliação de cada coeficiente, uma metodologia específica, é proposta baseada na performance de ventilação de uma célula de referência C_0 ($C_x = f [C_0]$) que foi medida em um túnel de vento e para a qual se encontrou $C_0 = 0,6$.

A célula de referência é uma construção de zona única com 30 m² e de 3 e 4 m de altura e telhado em uma única água (10°) na direção do vento predominante. Aberturas de entrada e de saída correspondem a 30 % das fachadas que estão perpendiculares a direção do vento, enquanto que o eixo principal do edifício está na

mesma direção do vento dominante. Finalmente considera-se que a célula está localizada em um terreno plano livre de obstruções.