

**Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**  
**Departamento de Engenharia de Construção Civil**

ISSN 0103-9830  
**BT/PCC/483**

---

**Determinação de parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar frio pelo piso em ambiente de escritório.**

---

**Viviane Caroline Abe**  
**Brenda Chavez Coelho Leite**

São Paulo – 2008

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Construção Civil  
Boletim Técnico – Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros  
Vice-Diretor: Prof. Dr. José Roberto Cardoso

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves  
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

Conselho Editorial  
Prof. Dr. Alex Abiko  
Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso  
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.  
Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves  
Prof. Dr. Paulo Helene  
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico  
Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Este texto faz parte da dissertação de mestrado de título “Determinação de parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar frio pelo piso em ambiente de escritório”, que se encontra à disposição com os autores ou na biblioteca da Engenharia Civil.

## FICHA CATALOGRÁFICA

ABE, Viviane Caroline  
Determinação de parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar frio pelo piso em ambiente de escritório. – São Paulo : EPUSP, 2008.  
14 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/483)

1. Ar condicionado 2. Dinâmica dos fluidos computacional 3. Análise numérica.

I. LEITE, Brenda Chávez Coelho II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série

ISSN 0103-9830

## DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE AR FRIO PELO PISO EM AMBIENTES DE ESCRITÓRIOS

Viviane C. Abe; Brenda C. C. Leite

Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – e-mail: viviane.abe@poli.usp.br; brenda.leite@poli.usp.br

### RESUMO

Atualmente, um dos principais requisitos para que um ambiente de escritório atenda plenamente às necessidades de uso e ocupação é a flexibilidade, mas com conforto. O sistema de distribuição de ar frio pelo piso (*Underfloor Air Distribution System* – UFAD) está sendo utilizado nos edifícios de escritórios para garantir a flexibilização integrada do sistema com o mobiliário. Trata-se de um sistema que fornece ar frio proveniente de um *plenum*, através de difusores localizados nos painéis do piso elevado. Os difusores de ar podem ser ajustados, ou reposicionados pelos próprios usuários dos ambientes, possibilitando o controle das condições térmicas no entorno próximo, de acordo com suas preferências individuais. Embora o sistema de distribuição de ar pelo piso apresente diversas vantagens com relação ao sistema de distribuição de ar convencional, ainda há falta de informações objetivas e diretrizes de projeto padronizadas, havendo a necessidade de realização de mais pesquisas na área. A introdução da Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) apresentou uma alternativa para as pesquisas experimentais relacionadas ao estudo do escoamento do ar. Assim, para o desenvolvimento do presente estudo foram utilizados recursos de dinâmica dos fluidos computacional, com o uso do código FLUENT. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma estratégia para a determinação dos parâmetros de operação de sistemas de distribuição de ar pelo piso aplicados a ambientes de escritórios. A estratégia baseia-se no estabelecimento de inter-relações entre os principais parâmetros que definem o escoamento do ar em ambientes com o sistema de distribuição de ar pelo piso: a vazão de ar insuflado, a temperatura do ar insuflado e a diferença de pressão entre o *plenum* pressurizado e o interior do ambiente. O emprego da estratégia possibilita que o projetista identifique as diversas combinações entre os parâmetros de operação que resultem numa mesma condição desejada, permitindo assim a escolha da opção mais satisfatória.

Palavras-chave: Ar condicionado. Dinâmica dos fluidos computacional. Análise Numérica.

### ABSTRACT

Nowadays, the flexibility for changes maintaining thermal comfort conditions is one of the main requirements of an office room to fully answer to the use and occupation needs. The underfloor air distribution system is being used in the office buildings to guarantee the integrated flexibility of the system with the furniture layout. The system supplies cooled air to the room from a pressurized plenum, passing through air diffusers located in the raised floor panels. The air diffusers can be adjusted or relocated by the room users themselves, making possible the control of the thermal conditions in their surroundings, according to their individual preferences. Though the underfloor air distribution system presents a lot of advantages with regard to conventional overhead distribution systems, there is still a lack of objective information and standardized guidelines, and the necessity of accomplishment of more researches about the subject. The introduction of Computational Fluid Dynamics presented an alternative for the experimental tests related to the study of airflow in rooms. Thus, for the development of the present study a CFD tool was used, the code FLUENT. The purpose of the present work is to present a strategy for the determination of the operation parameters of an underfloor air distribution system applied to office rooms. The strategy is based on the establishment of interrelations between the main parameters that define the airflow in rooms with the underfloor air

distribution system: the input volume flux, the input air temperature and the pressure difference between underfloor plenum and the room. The use of this strategy enables the designer to identify several combinations of the operation parameters that result in one desired condition, allowing the choice of the most satisfactory option.

Key-words: Air conditioning (HVAC systems). Computational Fluid Dynamics. Numerical Analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de ar frio pelo piso fornece ao ambiente ar resfriado proveniente de um *plenum*, através de difusores localizados no piso. O *plenum* é o espaço livre entre dois níveis de piso (laje e piso elevado), geralmente de pequena altura (cerca de 30 cm). O ar é insuflado a baixas velocidades diretamente na zona ocupada. O ar insuflado através dos difusores de piso é misturado com o ar ambiente e, à medida que entra em contato com as fontes de calor, sofre um aumento da temperatura e sobe por convecção natural.

As principais características desse sistema são: promove a troca de calor com o ambiente mais rapidamente, pode climatizar apenas o volume de ar do espaço efetivamente ocupado, opera com temperaturas do ar mais elevadas do que as adotadas nos sistemas convencionais com insuflação pelo teto. Tais características podem permitir um menor gasto de energia, maior controle das condições de conforto pelos ocupantes, melhoria da eficiência da ventilação e qualidade do ar, com possibilidade de uso de 100% de ar externo, com melhoria da produtividade e da saúde dos ocupantes (SODEC e CRAIG, 1990; BAUMAN e WEBSTER, 2001; BAUMAN, 2003).

Embora o sistema de insuflação de ar pelo piso apresente diversas vantagens com relação ao sistema de climatização convencional, conforme citado anteriormente, ainda há falta de informações objetivas e diretrizes de projeto padronizadas (BAUMAN e WEBSTER, 2001; MATSUNAWA et al., 1995; CHARLES, 2002). Questões fundamentais relativas à estratificação do ar, às trocas térmicas entre o ar do *plenum* e a laje do piso e à influência do mobiliário no escoamento do ar, por exemplo, ainda precisam ser esclarecidas.

No presente estudo, propõe-se uma estratégia para a definição dos parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar pelo piso, aplicado a ambientes de escritórios e com uma determinada carga térmica interna, a partir do estabelecimento de inter-relações de três variáveis: a vazão e a temperatura do ar insuflado e a diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o interior do ambiente. A estratégia será proposta a partir de resultados de simulações numéricas feitas utilizando o FLUENT.

Este estudo é uma continuação dos trabalhos desenvolvidos por Leite (2003) e Pustelnik (2005). Leite (2003) avaliou o potencial de aplicação de um sistema de distribuição de ar pelo piso em edifícios de escritórios no Brasil, tendo em vista garantir condições de conforto térmico no interior dos ambientes. Para o desenvolvimento da pesquisa, uma câmara experimental foi montada, com características similares a um ambiente de escritório. Medições de temperatura e velocidade do ar foram realizadas para avaliar quais os parâmetros de operação do sistema resultariam em condições de conforto térmico. No trabalho de Leite (2003) foram definidos os parâmetros de operação do sistema, considerando-se uma dada carga térmica interna. Pustelnik (2005) realizou simulações numéricas do trabalho de Leite (2003). O autor inicialmente reproduziu um estudo de caso apresentado na literatura para verificar a correta utilização da ferramenta computacional e em seguida realizou simulações da câmara experimental. Segundo Pustelnik (2005) os resultados numéricos obtidos utilizando o FLUENT apresentaram boa concordância em alguns pontos analisados, empregando-se os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e RSM.

### 1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem por objetivo apresentar uma estratégia para a determinação de parâmetros para operação de sistemas de distribuição de ar pelo piso aplicados em ambientes de escritórios utilizando, para tanto, recursos de dinâmica dos fluidos computacional.

A estratégia baseia-se no estabelecimento de inter-relações entre os principais parâmetros que definem o escoamento do ar em ambientes com esse sistema de distribuição de ar: a vazão, a temperatura do ar insuflado e a diferença de pressão entre o *plenum* pressurizado e o interior do ambiente.

A análise das possíveis combinações dos parâmetros, que resultem numa determinada condição interna (desejada), pode indicar estratégias de controle do sistema.

O desenvolvimento e a verificação da estratégia serão baseados em um teste realizado em uma câmara experimental com características semelhantes a um ambiente de escritório, com o sistema de distribuição de ar pelo piso. No referido teste, foram medidos os valores de velocidade e temperatura do ar, próximos a um difusor de piso. As condições do ambiente durante a medição são consideradas ideais, ou seja, são as condições que se deseja manter no ambiente. A partir dessa condição ideal, a estratégia proposta auxiliará o estabelecimento de possíveis parâmetros de operação para que as condições resultantes no ambiente sejam satisfeitas.

## 2 OBJETO DE ESTUDO

São apresentadas, a seguir, as características da câmara de testes desenvolvida por Leite (2003), na qual foram realizadas as medições experimentais que serviram de referência para o presente estudo.

Trata-se de um escritório nos moldes do que existe nos edifícios brasileiros contemporâneos. É uma câmara de testes com 34,8 m<sup>2</sup> de área, com possibilidades de distribuição de ar pelo piso e pelo teto. Para representar o *layout* de escritórios, foi projetado e construído o mobiliário para compor três estações de trabalho.

Nesta câmara experimental foi realizado um teste, cujo resultado foi utilizado no presente estudo como base para a verificação da adequação da estratégia proposta. Trata-se de teste realizado por Leite (2004), com o objetivo de verificar a perda de carga em um único difusor de ar. Para a realização do teste, somente um difusor de ar foi mantido aberto possibilitando a medição precisa dos campos de velocidade e temperatura do ar insuflado sem a influência dos fluxos adjacentes, provenientes dos demais difusores.

O difusor utilizado no teste (difusor do tipo “swirl”) é bastante comum em ambientes com o sistema de distribuição de ar pelo piso, e se caracteriza pelo jato de ar espiralado. Este jato proporciona a mistura rápida do ar frio, insuflado no ambiente, com o ar existente no interior do ambiente.

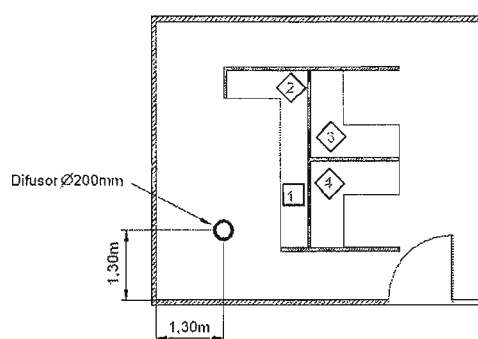


Figura 2.1 – Indicação do difusor de ar escolhido para as medições do teste

Para a realização do teste, foi mantido aberto apenas um difusor de Ø 200 mm, na posição indicada na figura 2.1. Durante o teste, somente os microcomputadores 1 e 3, com potência dissipada de 97,6W cada. As duas saídas de ar (retornos) mais próximas ao local onde foram realizadas as medições também foram vedadas. Os testes foram realizados na condição de regime permanente, onde o diferencial de pressão estática do *plenum* para o ambiente foi mantido constante em 25 Pa.

Segundo Leite (2004), foram determinados 12 perfis de temperatura e velocidade do ar, com base nos dados de medições simultâneas de seis termômetros do tipo PT100 e seis anemômetros do

tipo “esfera quente” (cuja faixa de medição é de 0,03 a 3,0m/s, com incerteza de 0,03m/s), posicionados nas alturas: 0,10m; 0,60m; 1,10m; 1,70m; 2,00m; 2,35m. As 12 baterias de medições foram feitas, segundo um plano horizontal, nos seguintes pontos: centro do difusor (C), a 5 cm do centro (G), na borda do difusor (B), a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90cm da borda do difusor.

### 3 DESENVOLVIMENTO DA ESTRATÉGIA PROPOSTA

Considerando que o objetivo do presente estudo é apresentar uma estratégia para a determinação dos parâmetros de operação de sistemas de distribuição de ar pelo piso, adotou-se o método descrito a seguir para o desenvolvimento do trabalho.

#### 3.1 ETAPAS 1 E 2

Segundo Fortuna (2000), não se pode garantir que o simulador forneça resultados representativos para qualquer combinação de parâmetros que envolvem os fenômenos de escoamento dos fluidos, sendo necessário realizar os processos de verificação e validação para garantir que, a partir dos testes realizados, resultados compatíveis com o fenômeno físico real sejam encontrados.

A etapa de verificação determina se a implementação do modelo corresponde à sua descrição conceitual. Essa etapa tem o objetivo de estimar a confiabilidade do processo de resolução do problema. Na etapa de validação a representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real é testada, por meio de comparações com dados experimentais representativos do fenômeno em estudo.

No presente estudo, assume-se que essas etapas já foram desenvolvidas no trabalho de Pustelnik (2005). Em seu estudo, Pustelnik (2005) realizou a simulação numérica de um experimento também realizado na câmara experimental descrita anteriormente, utilizando, para tanto, a mesma ferramenta computacional que a empregada neste trabalho (FLUENT). Sendo assim, para o presente estudo, admite-se que as equações diferenciais são corretamente resolvidas no Fluent e o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  padrão representa com boa aproximação o fenômeno físico a ser estudado.

Para a realização das simulações no presente estudo serão respeitadas as mesmas hipóteses e simplificações adotadas para a simulação do escoamento do ar em sistemas de distribuição de ar pelo piso, que aquelas estabelecidas no trabalho de Pustelnik (2005).

#### 3.2 ETAPA 3

Considerando-se que as etapas de verificação e validação foram realizadas, pode-se concluir que o modelo empregado é representativo do fenômeno físico em estudo. Assim, novas simulações numéricas baseadas no mesmo modelo podem ser realizadas para o estudo do escoamento do ar.

A estratégia proposta no presente estudo baseia-se na realização de simulações numéricas de um problema de ventilação mecânica no interior de um ambiente e estabelece uma relação entre três variáveis do problema.

A partir de um modelo validado, três simulações numéricas (no mínimo) são realizadas, alterando-se somente os parâmetros de operação (dados na entrada de ar).

Os resultados dessas simulações fornecem os dados de uma terceira variável, estabelecendo-se assim a relação entre as três variáveis (ver tabela 3.1). Assim, adotando-se na entrada de ar os valores “a1” e “b1” para as variáveis “a” e “b” (velocidade e temperatura do ar, por exemplo), respectivamente, o valor resultante para a variável “c” (pressão, por exemplo) é “c1”.

Tabela 3.1 – Valores das variáveis em estudo

Simulação	Variável a	Variável b	Variável c
Simulação 1	a1	b1	c1
Simulação 2	a2	b2	c2
Simulação 3	a3	b3	c3

### 3.3 ETAPA 4

A etapa 4 corresponde à construção do gráfico proposto, com base nos dados das simulações.

A construção do gráfico é dada pela determinação de três eixos de coordenadas, um para cada variável em estudo. O próximo passo consiste na inserção das variáveis. Para a simulação 1, relacionam-se os dados das três variáveis,  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$ , cujo resultado é um ponto,  $P_1$  (Figura 3.1). O mesmo processo é feito para os dados das simulações 2 e 3 (Figura 3.2).

A partir dos três pontos um plano  $\alpha$  (Figuras 3.3 e 3.4) é estabelecido, contendo todas as combinações entre as três variáveis.

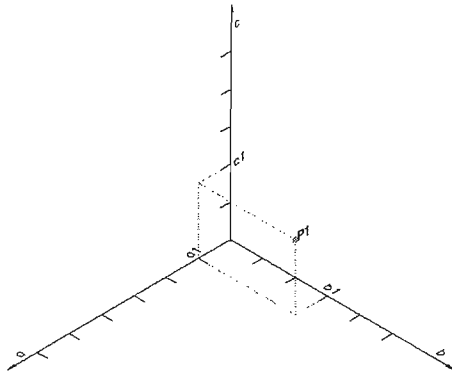


Figura 3.1 – Determinação do ponto P1

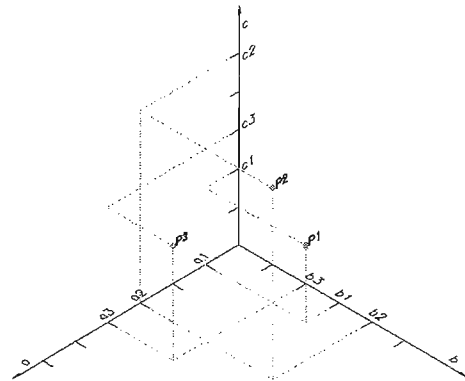


Figura 3.2 – Determinação dos pontos P2 e P3

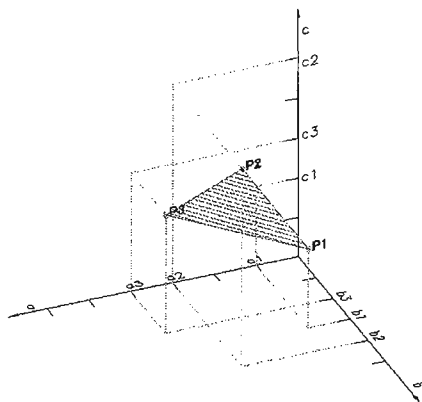


Figura 3.3 – Definição do plano  $\alpha$  por meio da ligação entre os pontos

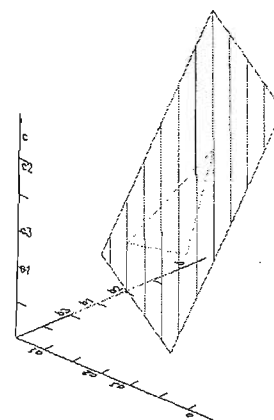


Figura 3.4 – Plano  $\alpha$

### 3.4 ETAPA 5

A etapa 5 corresponde à utilização do plano estabelecido em aplicações práticas.

Supondo que o projetista do sistema de ventilação mecânica esteja interessado em manter um valor " $c_4$ " para a variável " $c$ " no interior do ambiente, um valor " $a_4$ ", determinado pelo projetista, é adotado, para a variável " $a$ ". Os dados das variáveis " $a$ " e " $c$ " são então plotados no gráfico, conforme ilustrado na figura 3.5.

O ponto resultante do cruzamento dos dados " $a$ " e " $c$ " é projetado no plano  $\alpha$  (Figura 3.6), resultando no ponto  $P_4$ . A projeção do ponto  $P_4$ , ilustrada na figura 3.7, no plano das coordenadas " $a$ " e " $b$ " fornece o valor " $b_4$ " da variável " $b$ ", necessário para manter no ambiente o valor desejado para a variável " $c$ ".

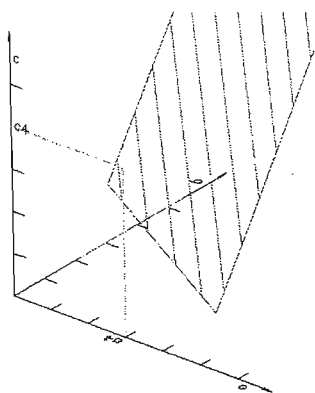


Figura 3.5 – Dados para as variáveis “a” e “c”

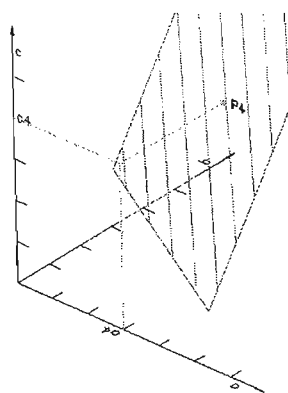


Figura 3.6 – Determinação do ponto P4

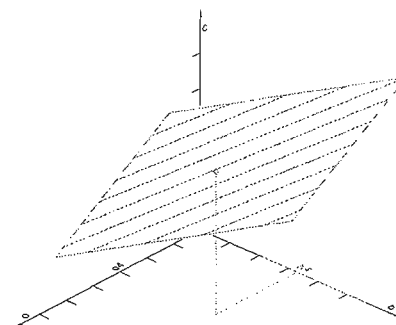


Figura 3.7 – Determinação do valor da variável “b”

## 4 VERIFICAÇÃO DA ESTRATÉGIA PROPOSTA

Para a verificação da estratégia proposta um teste foi realizado, com base no experimento descrito anteriormente. O experimento fornece os dados de velocidade e temperatura do ar medidos próximos ao difusor de piso, bem como um diferencial de pressão entre o *plenum* do piso e o interior do ambiente. A condição interna do ambiente durante a realização do experimento será adotada como condição ideal, ou seja, aquela que se deseja manter.

A estratégia descrita no capítulo 5 possibilita que sejam estabelecidas combinações de valores de vazão e temperatura, que resultem na condição desejada (diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o ambiente de 25Pa).

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS (ETAPA 3)

Neste item são apresentados os procedimentos adotados para a realização das simulações numéricas. Três simulações foram realizadas com diferentes combinações de valores de vazão e temperatura na entrada de ar. Como a condição desejada (experimental) é a manutenção do ambiente a uma diferença de pressão de 25Pa, foram extraídas das simulações os valores de diferença de pressão resultantes. Assim, foi possível estabelecer uma relação entre as três variáveis (vazão, temperatura e diferença de pressão) e determinar uma combinação (dentre as possíveis) de vazão e temperatura que resultou na diferença de pressão desejada.

As seguintes hipóteses<sup>1</sup> foram adotadas para a realização das simulações: escoamento turbulento em regime permanente; fluxo incompressível; fluxo de calor constante e uniformemente distribuído nos monitores de vídeo; paredes, divisórias, piso e teto considerados adiabáticos; difusor de ar e grelhas de retorno modelados como meios porosos. A seguir são descritos os procedimentos adotados para a realização das simulações.

#### 4.1.1 Modelagem da Geometria e geração da malha

A geometria da câmara experimental, ilustrada na figura 4.1, foi modelada no pré-processador GAMBIT, versão 2.1 (FLUENT INC., 2003c, 2003d e 2003e). Uma malha híbrida (figura 4.2), composta por elementos tetraédricos e hexaédricos, foi gerada com 779.249 elementos. Malhas estruturadas foram empregadas na entrada de ar, nos monitores, nas grelhas de retorno e na saída de ar.

<sup>1</sup> Modelo baseado no estudo de Pustelnik (2005), que simulou o experimento realizado por Leite (2003) na mesma câmara experimental utilizada no presente trabalho.



Já o processo de construção da malha no interior do ambiente (fluido) baseia-se na divisão do domínio computacional em elementos tetraédricos.

Um teste de independência de malha foi realizado para confirmar se os resultados das simulações independem da malha, ou seja, a malha escolhida não altera os resultados das simulações. A próxima etapa é definir as condições de contorno do modelo.

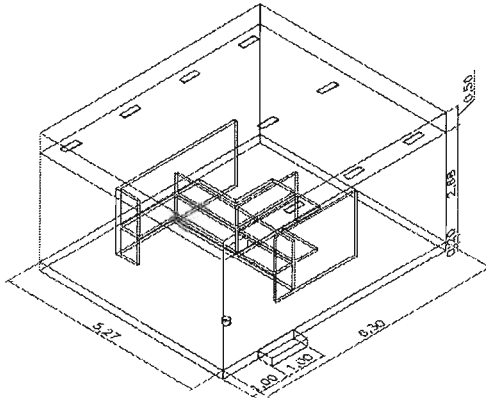


Figura 4.1 – Dimensões da câmara experimental

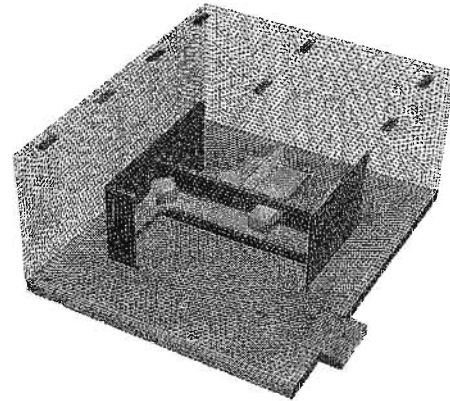


Figura 4.2 – Representação da malha 1 - Perspectiva

#### 4.1.2 Condições de Contorno

As seguintes condições de contorno foram adotadas para o presente estudo:

- **Entrada de ar:** modelada com a condição *Velocity inlet*, usada para definir a velocidade e as propriedades escalares do fluxo. Na entrada de ar, foram impostas as velocidades de 0,15, 0,20 e 0,16 m/s, para os testes 1, 2 e 3, respectivamente, normais à superfície de entrada de ar. A temperatura de insuflação do ar no teste 1 foi de 290K (17°C) e nos testes 2 e 3 de 294K (21°C);
- **Difusor de ar:** modelado como um cilindro no qual foi imposta, em sua superfície superior (em contato com o ar do interior da sala), a condição de contorno *fan*. Esta condição foi empregada para impor uma velocidade tangencial com o objetivo de reproduzir o perfil helicoidal de velocidades característico do fenômeno físico real. A velocidade tangencial imposta foi fixada em 0,4 m/s, para o eixo Z negativo. A região interna do cilindro foi caracterizada como um meio poroso, no qual foi imposta a perda de carga definida pela função  $y=21,509x^{2,0298}$ , conforme dados do fabricante;
- **Grelhas de retorno:** modeladas com a condição de meio poroso, no qual foi imposta uma perda de carga definida pela função  $y=0,031x^{2,0528}$ , conforme dados do fabricante;
- **Saída de ar:** modelada com a condição *Pressure Outlet*, usada para definir a pressão estática na saída de ar;
- **Paredes, divisórias, piso e teto:** modelados com a condição *Wall*, com fluxo de calor nulo. O conjunto foi considerado adiabático, ou seja, não troca calor com o meio;
- **Painel de lâmpadas:** como o painel de lâmpadas foi mantido desligado no experimento, na simulação foi modelado com a condição *Wall*, com fluxo de calor nulo;
- **Monitores de vídeo:** Modeladas fontes de calor sólidas, com dissipação de 97,4 W para cada monitor (2 monitores ligados).

#### 4.1.3 Método de solução numérica

Para o desenvolvimento do presente estudo, foi utilizado o software FLUENT 6.1.22 (FLUENT INC., 2003a, 2003b), código numérico para realização dos cálculos propriamente ditos.

O modelo de turbulência adotado para as simulações de comparação dos modelos de densidade do ar foi o  $k-\epsilon$  padrão. O ar foi considerado incompressível, tendo sido adotado o modelo de Boussinesq para a densidade.

As condições iniciais impostas para todos os testes foram de velocidades nulas nas coordenadas (x, y, z) e temperatura de 290K. Por se tratar de um escoamento em regime permanente, os resultados dos perfis de temperatura e de velocidade independem das condições iniciais.

Para a formulação do solver foi empregado o método segregado implícito e para a discretização das equações governantes foi empregado o esquema *upwind* de primeira ordem.

Adotou-se como critério de convergência a estabilização do perfil da velocidade média medida ao longo de uma linha imaginária (do piso ao teto) localizada sobre o centro do difusor de ar.

#### 4.1.4 Resultados das Simulações

As simulações foram realizadas utilizando-se os seguintes valores para vazão e temperatura na entrada de ar:

- Teste 1: 30 L/s e 290K;
- Teste 2: 40 L/s e 294K;
- Teste 3: 32 L/s e 294K.

Dos resultados das três simulações realizadas foram extraídos os diferenciais de pressão indicados na tabela 4.1, ou seja, para o ar insuflado a uma taxa de 30L/s e a uma temperatura de 17°C (290K), que corresponde ao teste 1, a diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o interior do ambiente é de 23,58Pa. Para o teste 2, o diferencial de pressão é de 39,56Pa e para o teste 3, de 26,29Pa.

Tabela 4.1 – Resultados dos testes

Teste	Velocidade (m/s)	Vazão (L/s)	Temperatura (K)	$\Delta p$ (Pa)
Teste 1	0,15	30,00	290,00	23,58
Teste 2	0,20	40,00	294,00	39,56
Teste 3	0,16	32,00	294,00	26,29

## 4.2 CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO PROPOSTO (ETAPAS 4 E 5)

Os dados experimentais representam uma condição a qual se deseja atingir. Do experimento em estudo sabe-se que o diferencial de pressão entre o *plenum* do piso e o interior da sala é de 25Pa. Sabe-se também que esse diferencial de pressão pode ser resultado de uma série de combinações entre vazão e temperatura do ar.

Assim, foi estabelecida uma relação entre a vazão, a temperatura do ar e a diferença de pressão, por meio de um gráfico em três dimensões que relaciona os três parâmetros. Para a construção do gráfico, foram utilizados os dados da tabela 4.1, que correspondem aos valores adotados na entrada de ar e à diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o ambiente, resultante da combinação desses valores.

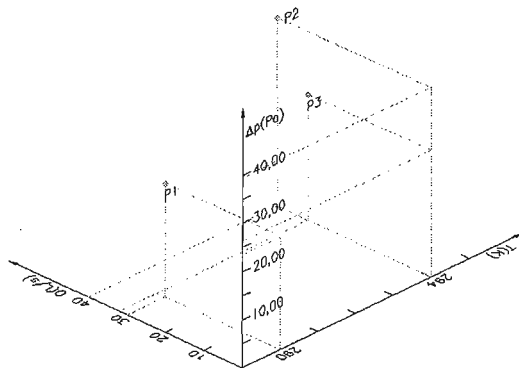


Figura 4.3 – Pontos resultantes dos testes

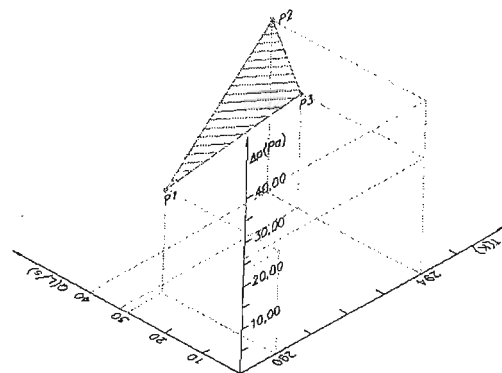


Figura 4.4 – Ligação entre os pontos resultantes

O gráfico ilustrado na figura 4.3 foi construído em três dimensões, com os eixos representados pelos parâmetros temperatura, vazão e diferença de pressão. Neste gráfico, são inseridos

os pontos correspondentes à combinação dos três parâmetros, para cada teste realizado. Os pontos P1, P2 e P3 são resultantes das simulações Teste 1, Teste 2 e Teste 3, respectivamente.

A ligação entre os pontos P1, P2 e P3 resultou em um plano, ilustrado na figura 4.4. O plano  $\beta$  (figura 4.5) contém as possíveis relações entre as três variáveis em estudo.

Assim, para uma determinada combinação entre vazão e temperatura, por exemplo, é possível obter o valor da diferença de pressão esperada, possibilitando ao projetista a determinação de diferentes combinações entre as variáveis, que resultem na condição desejada no interior do ambiente.

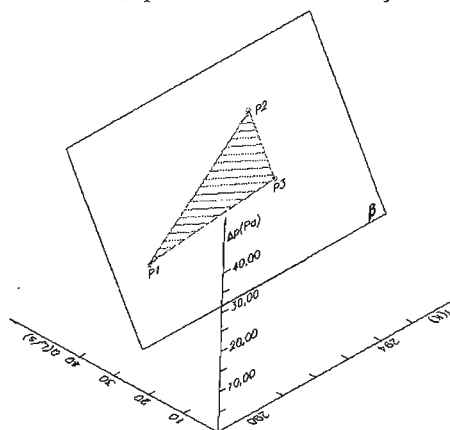


Figura 4.5 – Representação do plano  $\beta$

### 4.3 VERIFICAÇÃO DO GRÁFICO

No item anterior foi apresentado o modo de construção do gráfico. Porém, é necessário verificar se o gráfico construído fornece, de fato, resultados confiáveis.

Para tanto, serão adotados valores para duas variáveis (T e  $\Delta p$ ). O valor da variável desconhecida (Q) será determinado graficamente. Posteriormente, será realizada uma simulação utilizando o valor da variável obtido graficamente (Q), combinado com o valor de uma das variáveis, mantido constante (T). Espera-se que o resultado da simulação coincida com o valor adotado para a terceira variável ( $\Delta p$ ). O processo de verificação será descrito, a seguir, com maiores detalhes.

Para a verificação do gráfico, foram utilizados os dados do experimento em estudo. Deseja-se manter uma diferença de pressão de 25Pa entre o *plenum* do piso e o interior do ambiente. Assumindo-se que o ar seja insuflado a uma temperatura de 290K, é possível determinar, a partir do gráfico, o valor da vazão de ar necessário para que o valor de 25Pa seja estabelecido.

Os valores de pressão (25Pa) e temperatura (290K) são plotados no gráfico. O encontro desses valores é projetado no plano  $\beta$  (Figura 4.5), resultando no ponto P4.

A projeção do ponto P4 no plano formado pelos eixos correspondentes à vazão e à temperatura, fornece o valor da vazão necessária para manter a diferença de pressão desejada ( $Q_4=31,00$  L/s).

Para a verificação da estratégia uma nova simulação foi então realizada, com o valor de vazão de 31,00L/s, obtido graficamente. Para a temperatura, o valor adotado foi de 290K. Assim, espera-se que a diferença de pressão entre o *plenum* do piso e interior do ambiente seja de 25Pa.

#### 4.3.1 Resultados da Verificação

A estratégia será válida se a diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o ambiente for de 25Pa, para a vazão de 31,00L/s e a temperatura de insuflação de 290K.

A diferença de pressão entre o *plenum* do piso e o ambiente é de 24,8Pa, bastante próximo do valor esperado de 25Pa. Assim, considera-se que o gráfico está correto e tudo indica que a estratégia proposta pode ser utilizada para a determinação de parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar pelo piso.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A simulação foi realizada adotando-se uma combinação entre valores de vazão e temperatura do ar que resultassem na diferença de pressão de 25Pa. Como não foram encontrados registros dos valores adotados para essas variáveis quando da realização do experimento, uma outra combinação pode ter sido adotada, resultando em uma condição interna diferente.

Durante o experimento, a temperatura do ar insuflado provavelmente não ultrapassou os 295K (22°C), que foi o maior valor para a temperatura medida no centro do difusor, a 10 cm de altura do piso. A figura 5.1 apresenta a projeção do intervalo de temperatura de 290 a 295K no plano  $\beta$ , para uma diferença de pressão de 25Pa.

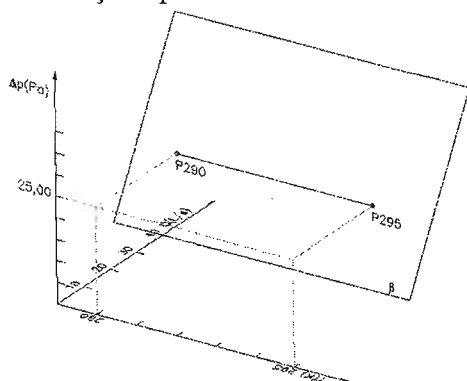


Figura 5.1 – Projeção do segmento de reta resultante do intervalo de temperaturas de 290 a 295K para a diferença de pressão de 25Pa

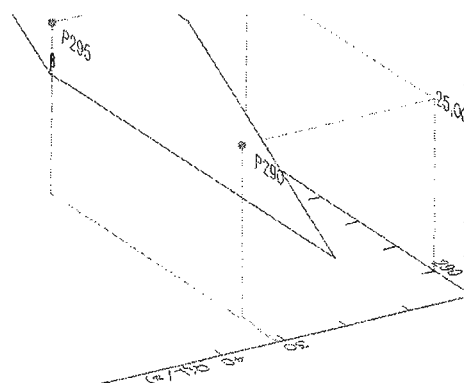


Figura 5.2 – Valores de vazão necessários para que, a uma dada temperatura, mantenha-se a diferença de pressão de 25Pa

Assim, é possível extrair o intervalo correspondente às vazões que resultem na diferença de pressão de 25Pa, para o intervalo de temperaturas considerado. A figura 5.2 mostra que, para o problema em questão, praticamente não há variação da vazão para o intervalo de temperatura considerado. A diferença é de apenas 0,05 L/s. Assim, pode-se concluir que o valor adotado para a vazão, na simulação, deve estar bastante próximo do real.

A determinação do valor estimado da temperatura do ar insuflado foi feita com base no trabalho de Leite (2003), que verificou, por meio de medições experimentais, que a diferença de temperatura entre a do ar insuflado no *plenum* (medido exatamente na entrada de ar no *plenum*) e a do ar medido a 10 cm de altura do piso pode chegar até a 5°C. Assim, para a simulação do presente estudo, foi adotado o valor de 17°C na entrada de ar, uma vez que o valor da temperatura medido a 10 cm do piso, no centro do difusor é de 22°C.

Do exposto acima, pode-se supor que foi estabelecida uma boa aproximação entre os dados adotados nas simulações com os dados experimentais para a entrada de ar. Ainda que os valores adotados na simulação não sejam exatamente os mesmos que aqueles adotados no experimento, as diferenças resultariam em discrepâncias de ordem qualitativa, o que não impede a análise dos perfis de temperatura e velocidade resultantes das simulações.

### 5.1 ANÁLISE DOS PERFIS DE VELOCIDADE E TEMPERATURA DO AR

A seguir, são apresentadas algumas considerações acerca dos resultados de velocidade e temperatura do ar resultantes da simulação realizada para verificação da estratégia proposta.

Os resultados das simulações nos pontos mais próximos ao centro do difusor de ar (Pontos C, G, B, 10, 20, 30 e 40) são bastante divergentes dos dados experimentais. De fato, a concordância com os dados experimentais nesta região é bastante difícil de ser obtida, dada a complexidade do comportamento do fluxo.

Ainda que os valores de velocidade e temperatura do ar insuflado adotados no experimento não tenham sido exatamente os mesmos que os empregados nas simulações, concordância relativa foi

obtida para os pontos 50 a 90. Nesta região, as diferenças entre os valores das simulações com os das medições são de no máximo 1,5°C, com os piores resultados situados no nível mais próximo ao piso (10 cm de distância do piso).

A análise dos dados de temperatura do ar resultantes da simulação mostra que para a validação de modelos de ambientes com o sistema de distribuição de ar pelo piso, deve-se evitar a comparação dos resultados das simulações com medições realizadas sobre o centro do difusor, ou próximas a ele. A comparação com dados extraídos de medições realizadas a uma distância mínima de 60 cm do centro do difusor (no caso em estudo corresponde ao ponto 50) garante resultados mais próximos ao real.

Para a velocidade do ar, os resultados das simulações indicam a predominância de velocidades muito baixas ( $<0,1\text{m/s}$ ) no modelo, exceto na região próxima ao difusor de ar. Porém, a análise dos perfis de velocidade mostra que os valores resultantes encontram-se dentro da faixa de incerteza de medição da velocidade ( $\pm 0,06\text{ m/s}$ ), dificultando a comparação dos resultados das simulações com os dados experimentais.

## **6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho é uma alternativa para estudos do escoamento do ar em ambientes com o sistema de distribuição de ar pelo piso. A estratégia apresentada auxilia pesquisadores e projetistas no processo de tomada de decisões. A análise de diferentes combinações dos parâmetros de operação que resultem numa mesma condição pode ser bastante proveitosa, por exemplo, se conjugada com a análise do desempenho energético do sistema.

A estratégia também é válida para o controle do sistema, já que para manter constante um dos parâmetros, os demais devem ser mantidos dentro de um intervalo. Assim, conforme citado anteriormente, para manter o diferencial de pressão em 25Pa, há possibilidade de escolha de diversas combinações de temperatura e vazão.

O uso de uma ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional ao invés da realização de experimentos é vantajoso do ponto de vista de economia de tempo. Inúmeras combinações podem ser testadas em um prazo curto de tempo, ao contrário do que seria esperado caso os testes fossem realizados experimentalmente.

Contudo, ao se empregar programas computacionais para tentar simular situações reais, devem-se tomar precauções para se obter resultados confiáveis, pois, não necessariamente o resultado da simulação é real ou fisicamente possível. Portanto, todo cuidado é necessário e realizar comparações entre dados obtidos experimentalmente e os fornecidos pelo simulador tem importância fundamental. Deve-se assegurar que estas ferramentas computacionais sejam utilizadas e testadas adequadamente.

Conforme citado anteriormente, no presente estudo, considerou-se que o modelo empregado foi validado no trabalho desenvolvido por Pulstelnik (2005). Deve-se salientar, contudo, que o autor destacou diversas dificuldades encontradas durante o desenvolvimento das simulações, não tendo obtido concordância total com os dados experimentais. Assim, é importante ressaltar a necessidade de realização de mais simulações que garantam a confiabilidade total no modelo simulado.

Nesse contexto, este estudo se apresenta como uma das possibilidades de emprego de ferramentas de CFD, que agilizam o processo de projeto e o estudo dos sistemas de ventilação. No entanto, é importante destacar que mais estudos são necessários para aumentar a confiabilidade do modelo empregado.

Optou-se pela realização das simulações com o emprego do modelo k- $\epsilon$  padrão, já que, segundo Pustelnik (2005), os testes realizados com a utilização dos modelos k- $\epsilon$  resultaram em boa aproximação dos resultados das simulações com os experimentais. Sabe-se, contudo, que o modelo k- $\epsilon$  é recomendado para fluxos totalmente turbulentos, não sendo este o caso dos sistemas de distribuição de ar pelo piso.

Assim, há necessidade de direcionar esforços para o desenvolvimento de modelos de turbulência específicos para o sistema de distribuição de ar pelo piso, que poderiam trazer resultados mais precisos.

Para a realização do presente estudo empregou-se uma ferramenta de dinâmica dos fluidos computacional para a predição do escoamento do ar no interior de um ambiente com o sistema de distribuição de ar pelo piso. Os resultados das simulações foram utilizados para o estabelecimento de relações entre três parâmetros de operação do sistema, vazão, temperatura e diferença de pressão.

Embora a estratégia apresentada seja bastante simples, já que a relação entre três parâmetros é obtida diretamente de um gráfico, a realização das simulações numéricas ainda é tarefa bastante complexa. Mais estudos são necessários, principalmente para aprimorar a condição de contorno no difusor de ar, já que o modelo simplificado, desenvolvido por Pustelnik (2005) e empregado no presente estudo não resultou satisfatório para a região próxima ao centro dos difusores.

Dada a incerteza das simulações, faz-se necessário um estudo experimental que confirme a estratégia proposta. Nesse estudo, haveria a necessidade de confirmar se os dados de vazão e temperatura empregados para os três testes iniciais de fato resultariam na diferença de pressão indicada na tabela 6.1.

## REFERÊNCIAS

- BAUMAN, F. S.; WEBSTER, T. Outlook for underfloor air distribution. **ASHRAE Journal**, New York, v. 43, n. 6, p. 18-25, 2001.
- BAUMAN, F. **Underfloor air distribution (Ufad) design guide**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning, 2003. 243 p.
- CHARLES, K. E. **Office air distribution systems and environmental satisfaction**. Ottawa, Canada: National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction and Public Works & Government Services, 2002. 23 p. (Relatório técnico IRC-RR-161). Disponível em: <<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/fulltext/tr/rr161/rr161.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2005.
- CHEN, Q.; XU, W. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation. **Energy and Buildings**, Lausanne, n. 28, p.137-144, 1998.
- FLUENT INC. **Fluent 6.1**: tutorial guide. Lebanon, NH, 2003a. CD-ROM.
- \_\_\_\_\_. **Fluent 6.1**: user's guide. Lebanon, NH, 2003b. CD-ROM.
- \_\_\_\_\_. **Gambit 2.1**: modeling guide. Lebanon, NH, 2003c. CD-ROM.
- \_\_\_\_\_. **Gambit 2.1**: tutorial guide. Lebanon, NH, 2003d. CD-ROM.
- \_\_\_\_\_. **Gambit 2.1**: user's guide. Lebanon, NH, 2003e. CD-ROM.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**: conceitos básicos e aplicações. São Paulo: EUSP, 2000. 426 p.
- LEITE, B. C. C. **Relatório de teste**. São Paulo: EPUSP, 2004. 9 p.
- \_\_\_\_\_. **Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios**: avaliação do conforto térmico e condições de operação. 2003. 162 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**: fundamentos e coordenadas generalizadas. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 424 p.
- MATSUNAWA, K.; IIZUKA, H.; TANABE, S. Development and application of an underfloor air-conditioning system with improved outlets for a "smart" building in Tokyo. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 101, pt. 2, p. 887-901, 1995.
- PUSTELNIK, M. **Avaliação numérica de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- SODEC, F.; CRAIG, R. The underfloor air supply system: the European experience. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 96, pt. 2, p. 690-695, 1990.