

MERCOFRIO 2000 - CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE DIFUSORES DE AR

Carlos A. A. Vilela - carlosav@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM
Departamento de Energia - DE
Campinas - SP - Brasil
Caixa Postal 6122
CEP 13088-970
Marcelo C. Silva - mcsilva@fem.unicamp.br

***Resumo.** Este trabalho apresenta a simulação numérica de difusores de ar comumente utilizados em sistemas de distribuição de ar condicionado central. Foram escolhidos para estudo vários modelos de difusores para luminárias sob várias condições de operação. São analisados os perfis de distribuição de pressão e linhas de corrente do escoamento de ar interno no difusor. Foi considerado escoamento adiabático, bidimensional e as equações para descreverem o fenômeno foram as equações de Navier-Stokes e da conservação da massa. Como ferramenta de estudo, foi utilizado o pacote computacional Ansys®, baseado no método dos elementos finitos. O objetivo principal deste trabalho é a identificação de zonas de recirculação no escoamento, já que uma grande parte da perda de carga e geração da potência sonora do componente ocorrem pelas presenças destas zonas.*

***Palavras chave:** Simulação numérica, Difusores, Elementos finitos,*

1. INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas computacionais para simulação de fenômenos envolvidos em escoamento de fluidos tem sido amplamente difundido nas últimas décadas devido a rapidez em se obter os resultados, no baixo custo em relação aos aparatos experimentais e também pela qualidade destes resultados. Os métodos mais comuns utilizados para aproximação das equações governantes são os métodos dos elementos finitos, volumes finitos e diferenças finitas. Constantes pesquisas tem sido desenvolvidas com o objetivo de melhoria nos métodos de aproximação das equações governantes dos fenômenos, isto envolve novos esquemas discretizantes, novos métodos de solução de matrizes, novos conceitos de distribuição de malha, etc.

O método dos elementos finitos por sua característica de fazer uma relação entre plano físico e plano transformado (normalizado) onde todos os elementos têm uma forma padrão, tem sido bastante usado em casos onde a geometria do problema é complexa, sendo esta representada por pequenos elementos que compõem o domínio. Mas pela necessidade de se tratar de problemas em geometrias complexas, já que grande parte dos casos reais são classificados como possuindo geometrias complexas, novas formulações têm sido desenvolvidas para que sejam possíveis as aplicações dos métodos de volumes finitos e diferenças finitas nestas geometrias.

O tratamento das equações governantes em um sistema de coordenadas generalizadas tem sido muito utilizado por pesquisadores atualmente. Mais recentemente Shyy(1998), Date(1998) entre outros, têm usado esta formulação para solução de problemas de engenharia, utilizando o método dos volumes finitos. A constante verificação e validação de resultados obtidos por estes métodos vem a cada trabalho, consolidar mais a consistência e segurança nas simulações numéricas.

Ferramentas computacionais foram, e ainda são, desenvolvidas ao longo do tempo como uma forma mais prática para utilização destes métodos para simulação. Hoje vários programas comerciais já com grande número de usuários nas mais diversas áreas são encontrados no mercado, e alguns dos mais conhecidos são o Ansys, Fluent, Phoenix e são bastante utilizados para desenvolvimento de novos projetos ou para otimização de projetos já existentes.

Martin(1999) além de comentar sobre as vantagens do uso de CFD para solução de problemas, utiliza o programa Fluent como ferramenta para estudo da distribuição de pressão e temperatura em uma sala. Devido as grandes vantagens de se utilizar CFD, a sua aplicação em sistemas HVAC tem crescido muito. A qualidade dos resultados numericamente obtidos, comparando-se com dados experimentais, reforçam mais e mais a confiabilidade desta ferramenta. Williams *et al*(1994) e Chorin(1997) apresentam alguns resultados obtidos em estudos de distribuição de ar em salas residenciais ou comerciais. Alguns autores no entanto, criticam a utilização de CFD para simulação de sistemas HVAC. Dentre as críticas mais apontadas, a que mais parece ressaltar é o fato de os programas utilizarem um modelo matemático para descrever o escoamento no domínio inteiro, ou seja, pode-se utilizar um modelo para escoamento turbulento ou um para laminar, e isso implica a utilização em regiões onde o escoamento não seja aquele para que o modelo foi desenvolvido. Como um exemplo prático disto pode-se observar o caso de um recinto de grandes proporções onde o insuflamento de ar seja através de difusores. Na região próxima aos difusores o escoamento pode ser tratado como turbulento, mas nas regiões mais afastadas o escoamento tem características de laminar, e o uso de um modelo para descrever todo o domínio seria uma aproximação, em alguns casos grosseira, nas regiões não precisamente descritas pelo modelo utilizado. Este fato é discutido por Baker *et al*(1997).

Grande parte da potência sonora gerada em um componente, é devido à perda de carga localizada, Stoecker(1985), e por esta razão o objetivo principal deste trabalho é o estudo do escoamento interno em difusores de ar da linha Light Troffer, visando a identificação das zonas de recirculação, que são as grandes responsáveis pela perda de carga e aumento de potência sonora, e a distribuição de pressão. A utilização de ferramentas computacionais para este fim, torna o estudo mais rápido e flexível. O programa Ansys, baseado no método dos elementos finitos, foi utilizado como ferramenta para as simulações dos componentes.

2. METODOLOGIA

O software utilizado, Ansys, está baseado no método dos elementos finitos, e foram utilizadas malhas não estruturadas com elementos triangulares lineares. Na geração da malha foi buscado a construção de elementos os mais regulares possíveis, pois quanto maior a deformação dos elementos maiores serão os erros adicionais ao método, Reddy(1993). O método de interpolação utilizado é o SUPG, por apresentar maior consistência e estabilidade em casos de escoamento de altos números de Reynolds, Brooks(1982).

Os testes a seguir foram feitos considerando escoamento bidimensional, em regime permanente e adiabático, e as equações utilizadas que descrevem o escoamento são as seguintes:

Navier-Stokes

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g_x \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g_y \quad (2)$$

Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

A hipótese de escoamento adiabático foi feita considerando o fato de que a troca de calor dentro do difusor é muito pequena em relação a troca ocorrida nos dutos e dentro do recinto onde o ar seria insuflado, e a aproximação bidimensional foi utilizada considerando o fato dos difusores serem regulares em profundidade, eixo z.

As condições de contorno aplicadas podem ser resumidas abaixo:

Tabela 1. Condições de contorno

Não deslizamento nas paredes	$u_p = v_p = 0.0$
Velocidade uniforme na seção de entrada	Modelos I e II \rightarrow $u = u_e$ $v = 0.0$ <hr style="width: 50%; margin: 0;"/> Modelo III \rightarrow $u = 0.0$ $v = v_e$
Saída livre de escoamento na saída do difusor	$p_s = 0.0$

A perda de carga nos difusores é calculada segundo a equação abaixo, Fox(1994), que expressa a perda de carga entre duas seções em um trecho de escoamento:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{LT} \quad \text{onde} \quad \alpha = \frac{\int \rho \cdot v^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} \quad (4)$$

É considerada convergida a solução, quando é atingido o critério de convergência dado pela equação (5).

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k - \phi_i^{k-1}|}{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k|} \leq 10^{-6} \quad \text{onde } \phi \text{ é a variável observada} \quad (5)$$

3. RESULTADOS OBTIDOS

No estudo foram considerados os seguintes modelos de difusores: MODELO I, MODELO II, que estão apresentados a seguir.

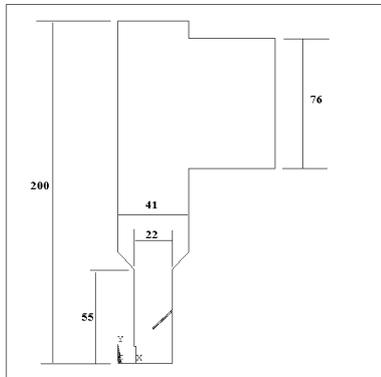


Figura 1-Modelo I

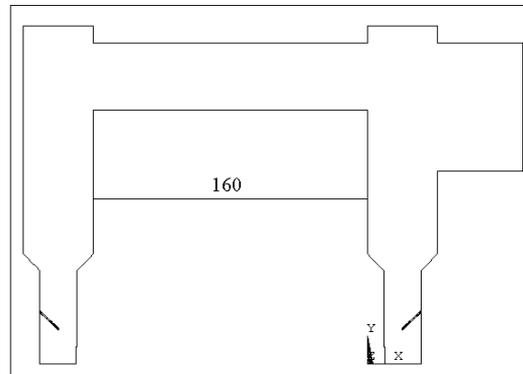


Figura 2-Modelo II

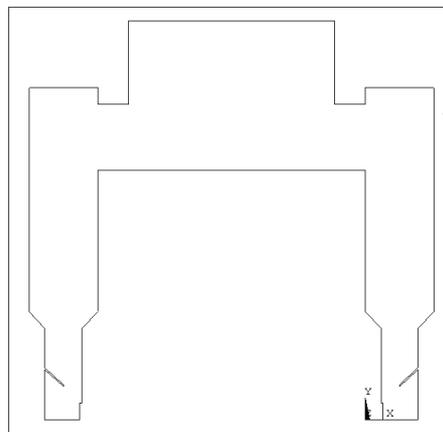


Figura 3-Modelo III

Dados mais detalhados relativos a vazão de trabalho, geração de ruído, geometria e construção de cada difusor, pode ser encontrado no catálogo de produtos Trox. Para o modelamento numérico em elementos finitos, foram utilizadas malhas não estruturadas, com elementos triangulares, refinadas nas regiões onde apresentam maior gradiente de velocidades.

Tabela 2. Constantes usadas no modelamento

Modelo	N. de nós	Velocidade de entrada [m/s]	¹ Parâmetro de estabilidade numérica
I / I (modificado)		$u_e = -0.5 / -2.0 / -5.0$ $v_e = 0.0$	10^{-3}
II / II (modificado)		$u_e = -0.5 / -2.0 / -5.0$ $v_e = 0.0$	10^{-3}
III / III (modificado)		$u_e = 0.0$ $v_e = -0.5 / -2.0 / -5.0$	10^{-3}

Os gráficos apresentados a seguir foram obtidos a partir dos resultados para as condições mais severas de escoamento, as de maior velocidade de entrada. Através dos

¹O parâmetro de estabilidade utilizado foi o de viscosidade artificial.

gráficos plotados de linhas de corrente ficam visíveis as zonas onde ocorrem os descolamento de fluido da parede.

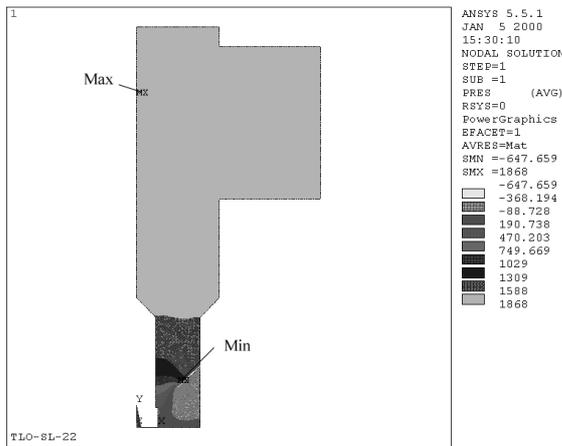


Figura 4-Modelo I, distribuição de pressão

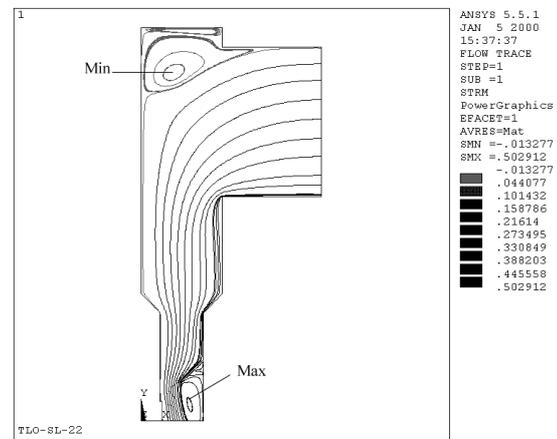


Figura 5-Modelo I, linhas de corrente

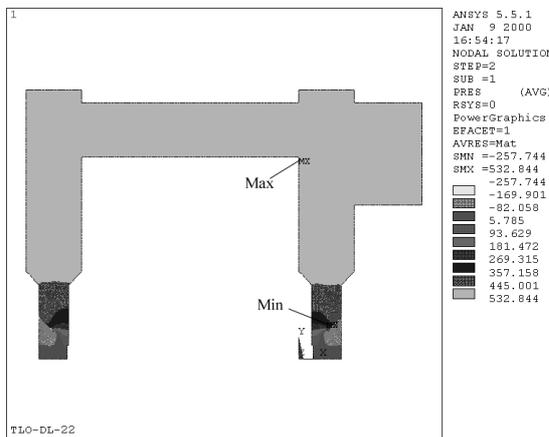


Figura 6-Modelo II, distribuição de pressão

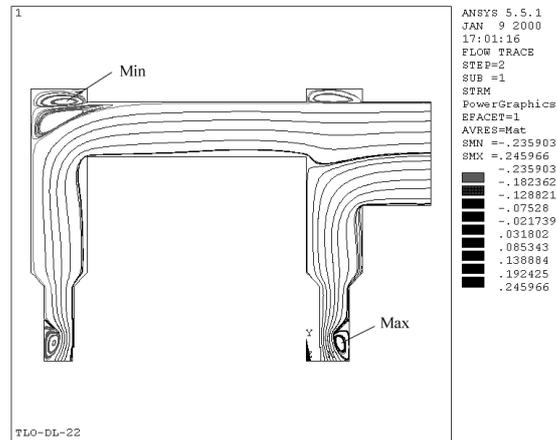


Figura 7-Modelo II, linhas de corrente

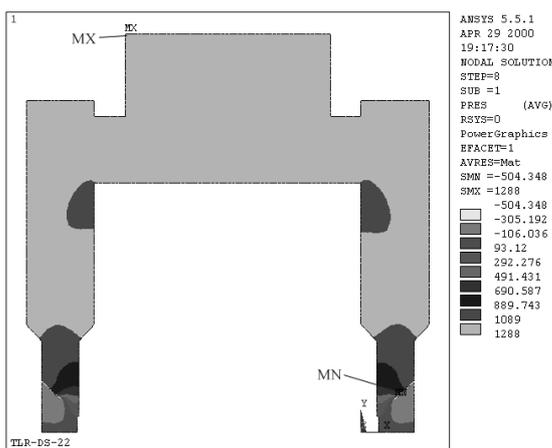


Figura 8-Modelo III, distribuição de pressão

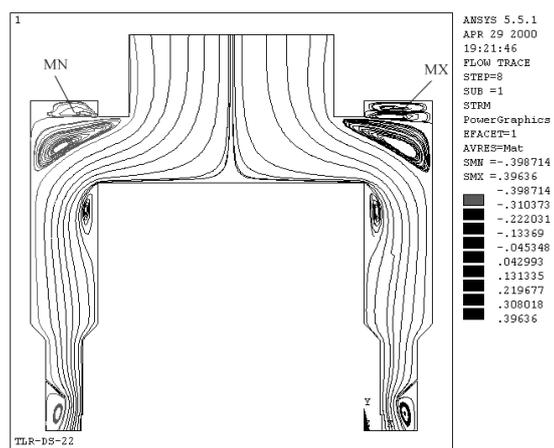


Figura 9-Modelo III, linhas de corrente

Para os modelos estudados, foram sugeridas algumas mudanças bastante simples na geometria construtiva, com o objetivo de eliminar as zonas de recirculação diminuindo a perda de carga e atenuando o ruído do componente. As mudanças sugeridas podem ser vistas nas figuras a seguir.

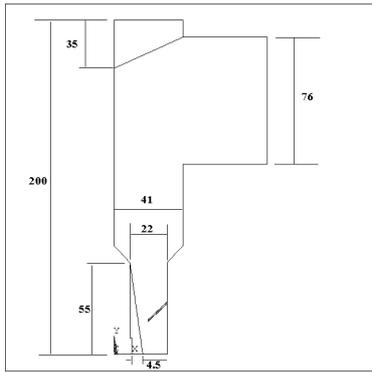


Figura 10-Modelo I modificado

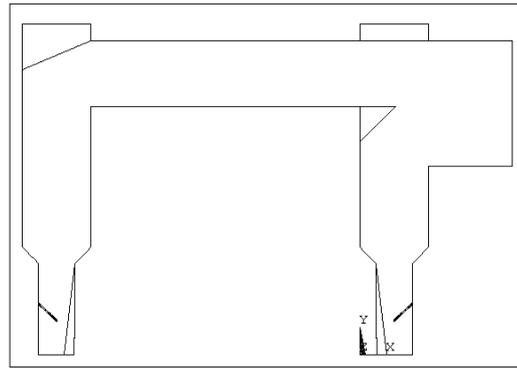


Figura 11-Modelo II modificado

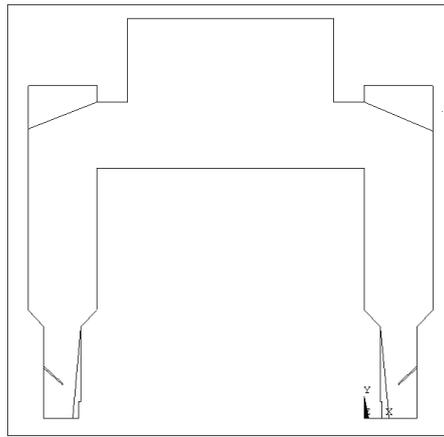


Figura 12-Modelo III modificado

Os gráficos abaixo, mostram os resultados obtidos pela simulação computacional do escoamento nos modelos modificados.

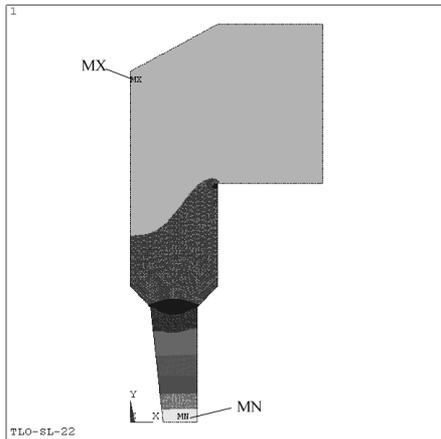


Figura 13-Modelo I modificado
distribuição de pressão

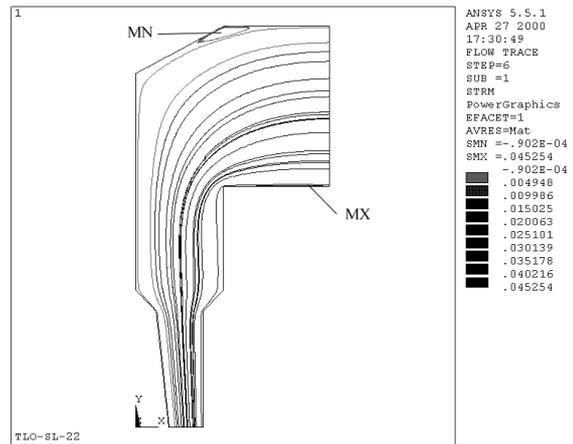


Figura 14-Modelo I modificado
linhas de corrente

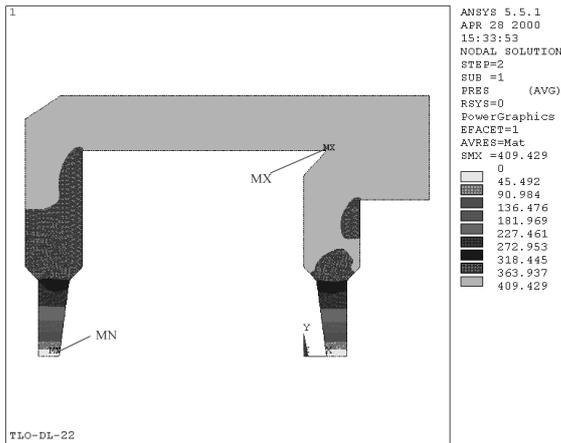


Figura 15-Modelo I modificado
distribuição de pressão

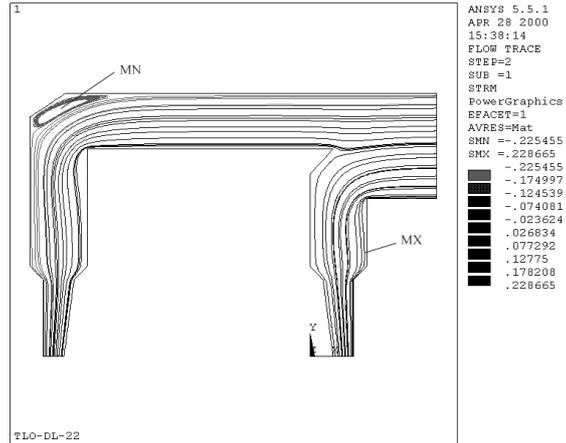


Figura 16-Modelo I modificado
linhas de corrente

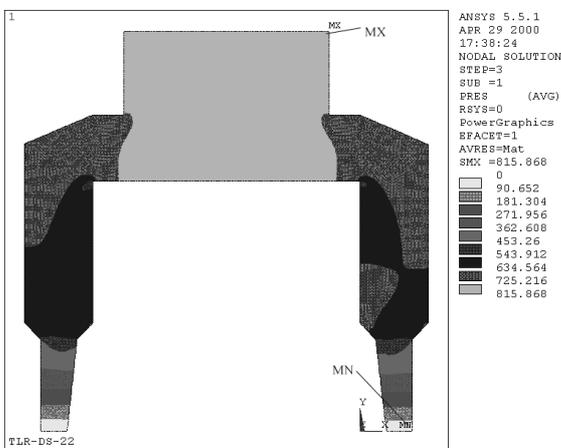


Figura 17-Modelo I modificado
distribuição de pressão

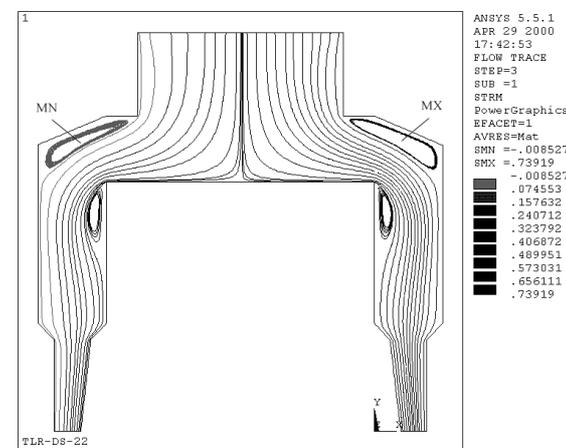


Figura 18-Modelo I modificado
linhas de corrente

Apresentados abaixo estão os resultados obtidos da comparação entre os difusores originais e modificados, e podemos notar a influência da modificação sugerida na diminuição da perda de carga e consequentemente na geração de ruído.

Tabela 3. Porcentagem de perda de carga reduzida

Modelo	Caso 1	Caso 2	Caso 3
I	20.5%	34.9%	22.2%
II	19.8%	24.5%	20.2%
III	20.0%	23.4%	26.0%

5. CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que com uma pequena modificação na geometria do difusor, consegue-se uma considerável redução na perda de carga. A diminuição da perda de carga nos difusores, por sua vez diminuirá a perda de carga de um sistema total de distribuição de ar o que acarretará em uma menor necessidade de potência nos ventiladores de insuflamento. A redução das zonas de recirculação nos difusores também deve diminuir consideravelmente o ruído gerado, dando condições para um mesmo

difusor de ser utilizado para vazões maiores mantendo o nível de ruído aceitável. A utilização da ferramenta computacional foi de grande valia, pois somente com os resultados em mãos que pode-se ter um mapeamento mais detalhado do escoamento e utilizar todas as informações disponíveis para a otimização dos difusores.

REFERÊNCIAS

Ansys Version 5.5 Users Manual.

Baker, A. J., Kelso, Richard M., Gordon, Elliot B., Roy, Subrata, Schaub Edward G.; "Computational Fluid Dynamics: A Two-Edge Sword", Ashrae Journal, vol. 39, n. 8, pp. 51-58, August 1997.

Brooks, Alexander N., J. R Thomas.; "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 32, pp. 199-259, 1982.

Catálogo de produtos, Trox do Brasil.

Chen, Qingyan; "Computational Fluids Dynamics for HVAC: Successes and Failures", Ashrae Transactions, vol. 103, n. 1, pp. 178-187, January 1997.

Date, A. W.; "Solution of Navier-Stokes Equations on Nonstaggered Grid at All Speeds", Numerical Heat Transfer, Part B, vol. 33, pp. 451-467, 1998.

Fox, R. W., McDonald, A. T.; "Introduction to Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, 1994.

Martin, Paul; "CFD in the Real World", Ashrae Journal, pp. 20-25, January 1999.

Reddy, J. N.; "An Introduction to the Finite Element Method", Second Edition, Mc Graw Hill, 1993.

Shyy, W., S. Pal, Udaykumar, H. S. and Choi, D.; "Structured Moving Grid and Geometric Conservation Laws for Fluid Flow Computation", Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 34, pp. 369-397, 1998.

Stoecker, Wilbert F., Jones, Jerold W.; "Refrigeração e Ar Condicionado", McGraw-Hill do Brasil, 1985.

Williams, R. T., Baker, A. J., Kelso, R. M.; "Numerical Calculation of Room Air Motion - Part 3: Three-Dimensional CDF Simulation of a Full-Scale Room Air Experiment", Ashrae Transactions, vol. 100, n. 1, pp. 549-564, January 1994.

Siglas

CDF - Computational Fluid Dynamics

HVAC - Heat, Ventilation and Air Conditioning

SUPG - Streamline Upwind Petrov-Galerkin

Agradecimentos

Trox do Brasil, pelos catálogos cedidos.