



DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO COM DISTRIBUIÇÃO DE AR PELO PISO PARA A MELHOR EFETIVIDADE DA VENTILAÇÃO

Renata Maria Marè (1); Brenda Chaves Coelho Leite (2)

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: rmare@abili.com.br
(2) Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: brenda.leite@poli.usp.br

RESUMO

Este estudo provê dados sobre a efetividade da ventilação de um sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso, referente à capacidade de remoção de contaminantes do ar interior, e as melhores condições de operação correspondentes. A pesquisa foi realizada sob regime transitório, em sala de aula no Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As medições foram efetuadas em seis dias alternados (diferentes estações do ano), variando-se o *setpoint* de temperatura do ar ambiente respeitando-se os intervalos (conforto térmico): $21^{\circ}\text{C} \leq T \leq 26^{\circ}\text{C}$ para temperatura do ar (nível 0,60 m); $0,10 < v < 0,30 \text{ m/s}$ para velocidade do ar; 50% para umidade relativa do ar. Os níveis de CO_2 e as concentrações de partículas foram medidos em oito pontos do ambiente, a 1,10 m e 2,60 m simultaneamente (zona de respiração para pessoas sentadas e exaustão do ar respectivamente), visando determinar o Índice de Efetividade na Remoção de Contaminantes (IERC). As grandezas temperatura e velocidade do ar foram medidas em quatorze pontos do ambiente a 0,10 m, 0,60 m, 1,10 m, 1,70 m, 2,00 m e 2,35 m. O $\text{IERC} = C_{2,60}/C_{1,10}$ (onde $C_{2,60}$ é a concentração de contaminantes próximo à exaustão do ar, e $C_{1,10}$ é a concentração de contaminantes na zona de respiração para pessoas sentadas) foi calculado para cada *setpoint* de temperatura do ar, tanto para ambiente ocupado como desocupado. O IERC resultante para o total de partículas em suspensão foi quase sempre maior para ambiente ocupado, sendo superior a 1 (típico deste tipo de sistema) para os *setpoints* de 23°C (ambiente ocupado) e 25°C (ambiente ocupado e desocupado). Os $\text{IERC}_{\text{CO}_2}$ foram próximos ou superiores a 1, o que mostra a eficiência deste sistema na remoção de CO_2 do ambiente. Foi constatada a relação do IERC com a presença de pessoas. Devido às baixas velocidades do ar e valores de total de partículas em suspensão para ambiente ocupado (menores que $0,035 \text{ mg/m}^3$), supõe-se que este sistema de climatização não dispersa contaminantes no ar do ambiente.

Palavras-chave: efetividade da ventilação, sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso, qualidade do ar interior.

1 INTRODUÇÃO

A efetividade da ventilação de um sistema de climatização pode ser avaliada pela sua capacidade de renovação do ar do ambiente e de remoção dos contaminantes do ar interior (MUNDT *et al.*, 2004), sendo esta expressa pelo Índice de Efetividade na Remoção de Contaminantes (IERC). Este índice é obtido pela relação entre a concentração de contaminantes no nível de exaustão do ar e a concentração de contaminantes na zona de respiração, sendo satisfatório quando superior à unidade. No sistema de climatização convencional (com insuflamento pelo teto), o IERC chega ao valor máximo de 1, e no sistema com insuflamento pelo piso pode chegar a 1,3 (CERMAK; MELIKOV, 2006).

O sistema com insuflamento pelo piso utiliza um *plenum* inferior, que corresponde à região compreendida pelo piso elevado e a laje inferior, para levar ar filtrado e climatizado diretamente à zona ocupada por meio de difusores, sendo que a exaustão do ar é usualmente feita pelo *plenum* superior, que corresponde à região compreendida pelo forro e a laje superior.

Existem muitas dúvidas a respeito da efetividade da ventilação do sistema com insuflamento pelo piso, devido à considerável deposição de partículas no *plenum* inferior. Também é conhecida a influência da fonte de contaminantes sobre a efetividade da ventilação além da ressuspensão de partículas (MUNDT, 2001).

Se bem projetado, operado e mantido, este sistema apresenta muitas vantagens quando comparado ao sistema convencional (BAUMAN, 2003; LEITE, 2003), tais como: o ar pode ser fornecido diretamente à zona ocupada (1,10 m); a estratificação da temperatura e a convecção natural contribuem para a melhor efetividade da ventilação e, portanto, melhor qualidade do ar interior; o ar é insuflado a temperaturas mais altas que no sistema convencional (18°C a 20°C) o que representa eficiência energética; este sistema aceita dispositivos para o controle individual da temperatura, o que proporciona maior conforto térmico no micro clima do usuário; flexibilidade no rearranjo dos difusores para novos *layouts* no ambiente.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar os dados obtidos relacionados à efetividade da ventilação do sistema de climatização estudado, no que concerne à sua capacidade de remover contaminantes do ar interior. São apresentadas ainda as condições de operação do sistema correspondentes à melhor efetividade da ventilação.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em uma sala de aula com geometria retangular e área de 180 m². O ambiente possui piso elevado com *plenum* inferior de 28 cm de altura. Nele estão 24 estações de trabalho para 2 alunos cada, desenvolvendo atividades leves, além da estação do professor. As pessoas e os equipamentos são as principais fontes de calor, mas a parede do fundo da sala apresenta 31 m² de janelas que permitem a radiação solar (Figura 1).

O sistema de climatização avaliado é do tipo expansão indireta, suprindo um *fan coil* de 7,5 TR de capacidade destinado a esta sala de aula. O *plenum* inferior é pressurizado e recebe ar a uma vazão de 5500 m³/h. O ar filtrado é insuflado no ambiente através de 77 difusores (diâmetro 200 mm) com jato de ar do tipo espiralado, e a exaustão do ar é feita através de 16 grelhas instaladas no forro, sendo forçada por meio de um ventilador. Visando atingir temperaturas do ar de insuflamento mais altas, o ar provindo do *fan coil* passa por uma caixa de mistura que também recebe parte do ar de retorno do ambiente (*bypass* de retorno).



Figura 1 – Ambiente objeto de estudo

O sistema de automação e controle tem o propósito de induzir o controle da temperatura do ar, vazão de ar e umidade relativa do ar. Existem cinco rotinas de controle que comandam este sistema: a freqüência de rotação do ventilador do *fan coil* varia para manter constante o diferencial de pressão entre o *plenum* e o ambiente; a freqüência de rotação do ventilador do retorno varia para manter constante o diferencial de temperatura entre o ar de retorno e o ar de insuflamento (mistura); a válvula de água gelada da serpentina do *fan coil* modula para que a temperatura do ar frio seja mantida em torno de um determinado *setpoint*; o *damper* de *bypass* de retorno e o *damper* de retorno para o *fan coil* modulam inversamente para que se atinja o *setpoint* da temperatura de insuflamento; os *dampers* de expurgo e de ar externo modulam diretamente e de acordo com os valores de entalpia do ar de retorno e do ar externo.

O método segue procedimentos baseados nas normas ISO 7726 (1998) e ASHRAE 55 (2004), bem como procedimentos adotados por Leite (2003) e Ikeda (2008). Foram consideradas condições de conforto térmico sendo o intervalo de temperatura do ar de $21^{\circ}\text{C} \leq T \leq 26^{\circ}\text{C}$ (nível 0,60 m), $0,10 < v < 0,30$ m/s para a velocidade relativa do ar e 50% para umidade relativa do ar.

A primeira etapa das medições foi realizada no período de transição entre inverno e primavera de 2008, e a segunda etapa das medições no período entre primavera e verão de 2009, em seis dias alternados, variando-se o *setpoint* de temperatura do ar ambiente de acordo com o intervalo apresentado. As concentrações de partículas e os níveis de CO_2 foram medidos em oito pontos do ambiente, a 1,10 m (zona de respiração para pessoas sentadas) e a 2,60 m (nível de exaustão do ar) simultaneamente (Figura 2) para ambiente ocupado e desocupado. Estes dados permitiram que se calculassem os IERC ou ε^c , tanto para concentrações de partículas como níveis de CO_2 , por meio da relação entre concentração de contaminantes na exaustão (c_e) e concentração de contaminantes na zona de respiração (c):

$$\varepsilon^c = \frac{c_e}{\langle c \rangle}$$



Figura 2 – Suporte para os contadores de partículas



Figura 3 – Hastes de suporte dos sensores de temperatura e velocidade do ar

Na primeira etapa do estudo, as concentrações de partículas foram avaliadas pelo seu total (Total de Partículas em Suspensão – TPS), e na segunda etapa, pelos totais de partículas de cinco diferentes diâmetros (0,5, 1,0, 3,0, 5,0 e 10,0 μm), visto que foram utilizados contadores de partículas distintos nas duas etapas. A temperatura do ar e a velocidade do ar foram medidas em 14 pontos do ambiente, e em seis diferentes níveis sendo 0,10, 0,60, 1,10, 1,70, 2,00 e 2,35 m (Figura 3).

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Algumas combinações de *setpoints* de variáveis foram estabelecidas para que o sistema de climatização atingisse os *setpoints* de temperatura do ar desejados no nível 0,60 m (conforto térmico). Na Tabela 1 são apresentados os resultados das condições de operação do sistema observadas na primeira etapa das medições para ambiente ocupado:

Tabela 1 – Condições de operação do sistema – sala ocupada – primeira etapa das medições

Variável / Setpoint de Temperatura (°C)	21	22	23	24	25	26
Temperatura do Ar Externo (°C)	21,9	23,7	27,1	18,6	28,9	30,6
Umidade Relativa do Ar Externo (%)	62	58	46	74	47	47
Diferencial de Pressão do Ar – ΔP (Pa)	4,50	5,07	4,01	3,01	5,87	3,69
Temperatura do Ar de Insuflamento (°C)	15,4	17,2	17,3	18,5	19,0	20,1
Temperatura do Ar no Plenum (°C)	17,9	19,4	19,4	19,6	22,5	22,3
Temperatura do Ar de Retorno (°C)	23,2	24,4	23,6	23,2	27,7	27,4
Diferencial de Temperatura do Ar – ΔT (°C)	7,8	7,2	6,3	4,7	8,7	7,3
Umidade Relativa do Ar Interno (%)	55	55	56	63	53	57
Umidade Relativa do Ar da Mistura (%)	70	66	67	71	70	67
Umidade Relativa do Ar de Retorno (%)	39	38	43	50	40	42

Para ilustrar os perfis de temperatura e velocidade do ar obtidos com as medições (ambiente ocupado), os resultados da primeira etapa do estudo são mostrados na Figura 4 e na Figura 5 (resultados similares foram obtidos na segunda etapa). Os valores médios correspondem aos 14 pontos do ambiente onde foram medidas estas grandezas. Os pontos a $-0,28$ m correspondem aos valores da temperatura do ar de insuflamento para cada *setpoint* de temperatura.

Os perfis de temperatura do ar mostram que do nível 0,10 m ao nível 0,60 m não houve variação de temperatura significativa. A estratificação da temperatura, típico fenômeno deste tipo de sistema de climatização (LEHRER; BAUMAN, 2003), mostra um ganho de temperatura do nível 0,10 m ao nível 1,70 m ao redor em 2° C, portanto inferior a 3° C de acordo com a norma ISO 7730 (2005), para que se mantenha o conforto térmico.

Os perfis de velocidade do ar mostram que, nos pontos da zona ocupada, em sua grande maioria, os valores foram inferiores a 0,10 m/s. Na maior parte dos casos, nos níveis 0,60 m e 2,00 m, grandes movimentações de ar foram verificadas, provavelmente devido ao ganho de carga térmica e aos efeitos do ventilador de exaustão, respectivamente.

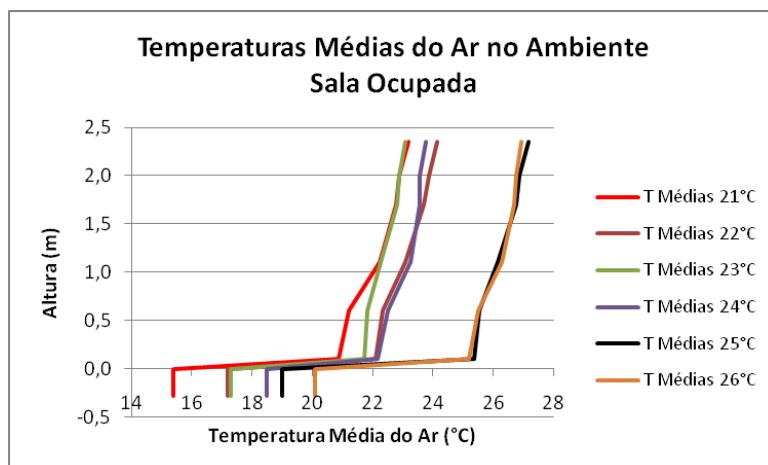


Figura 4 – Perfil de temperatura do ar (primeira etapa das medições): sala ocupada

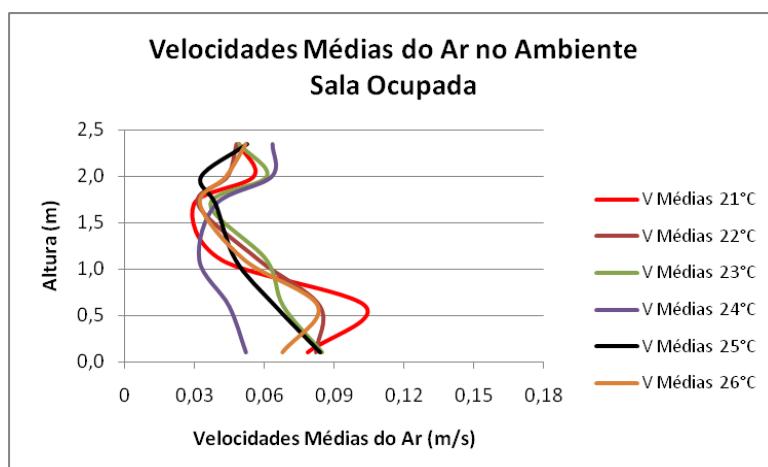


Figura 5 – Perfil de velocidade do ar (primeira etapa das medições): sala ocupada

A correlação entre o Total de Partículas em Suspensão (TPS – mg/m^3) a 1,10 m e a 2,60 m, temperatura e velocidade do ar na primeira etapa das medições é apresentada na Figura 6 e na Figura 7. TPS designa o valor médio nos oito pontos do ambiente onde foi medido. Comparando os gráficos,

a influência da presença de pessoas no ambiente é notável, pois as concentrações de TPS foram significativamente maiores para a sala ocupada. A influência da temperatura do ar sobre TPS pode ser observada: para os *setpoints* de 24°C, 25°C e 26°C, as concentrações foram maiores que aquelas medidas para 21°C, 22°C e 23°C em ambos os casos.

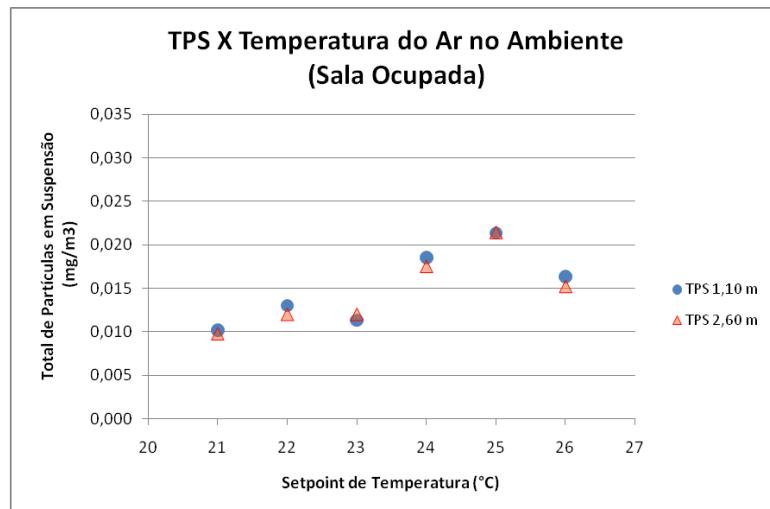


Figura 6 - Total de Partículas em Suspensão (mg/m³) X Temperatura do Ar (°C) para ambiente ocupado a cada *setpoint* de temperatura

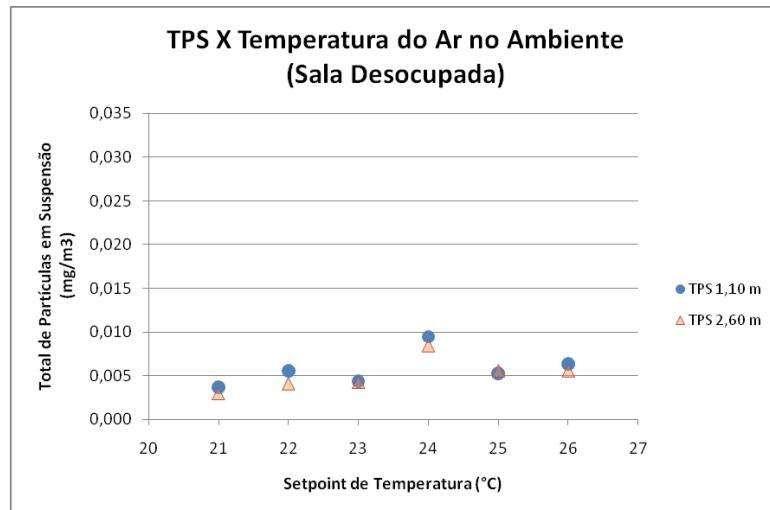


Figura 7 - Total de Partículas em Suspensão (mg/m³) X Temperatura do Ar (°C) para ambiente desocupado a cada *setpoint* de temperatura

A Figura 8 e a Figura 9 representam a variação de TPS (a 1,10 m e 2,60 m) com a velocidade do ar, tanto para sala ocupada como desocupada. Para a mesma faixa de velocidades do ar, aparentemente não há relação de TPS com a velocidade do ar, especialmente pelos baixos valores desta grandeza observados neste estudo (sempre abaixo de 0,10 m/s).

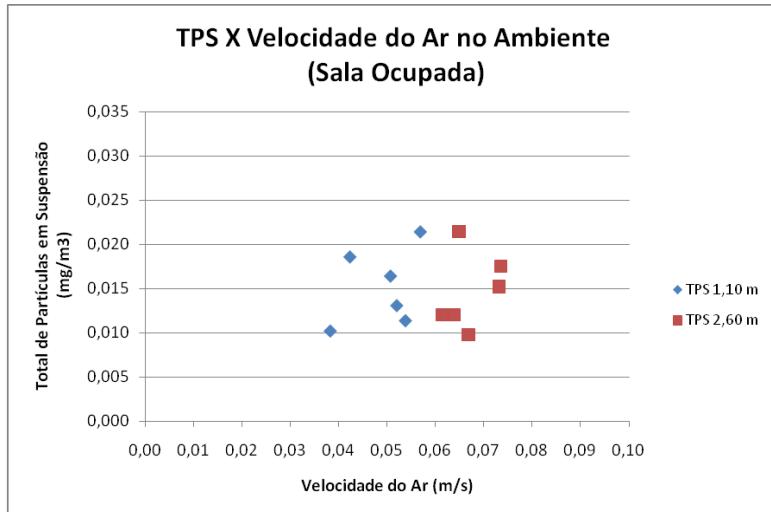


Figura 8 - Total de Partículas em Suspensão (mg/m^3) X Velocidade do Ar (m/s) para ambiente ocupado a cada *setpoint* de temperatura

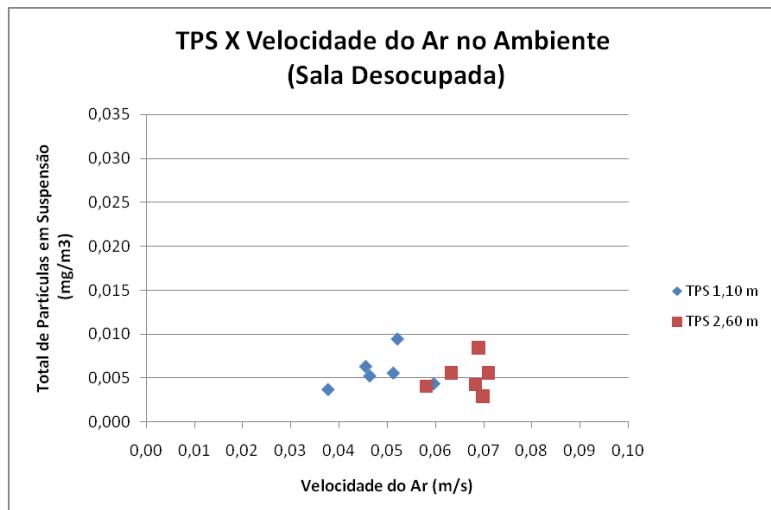


Figura 9 - Total de Partículas em Suspensão (mg/m^3) X Velocidade do Ar (m/s) para ambiente desocupado a cada *setpoint* de temperatura

Na Figura 10 são representados os índices IERC para os seis diferentes *setpoints* de temperatura do ar, para sala ocupada e desocupada (primeira etapa das medições). Na maior parte dos casos, os IERC foram maiores para sala ocupada, o que pode indicar a relação com a presença de pessoas. Isto pode ser justificado pela convecção natural que facilita o transporte de partículas em suspensão para os níveis mais altos do ambiente, o que proporciona concentrações de contaminantes mais altas no nível da exaustão do ar, comparando-se com o nível de respiração. O IERC superior à unidade, característico deste tipo de sistema de climatização, foi verificado para os *setpoints* de 23°C (sala ocupada) e 25°C (sala ocupada e desocupada).

Analizando-se os resultados de IERC para cinco diferentes tamanhos de partículas na segunda etapa das medições (Figura 11), os valores mais altos foram observados para sala ocupada, o que reforça as observações anteriores em relação à influência das pessoas. Os IERC para partículas de 0,5 μm foram sempre próximos ou inferiores a 1. Para partículas de 1,0 μm , foram sempre superiores a 1. Os maiores valores foram observados para partículas de 10,0 μm , 5,0 μm , e 3,0 μm , o que indica que este sistema é mais eficiente na remoção de partículas com diâmetros iguais ou superiores a 1,0 μm . Para os *setpoints* de 22°C e 26°C todos os IERC foram superiores a 1, o que indica que provavelmente nestes dias foram adotadas as melhores condições de operação do sistema.

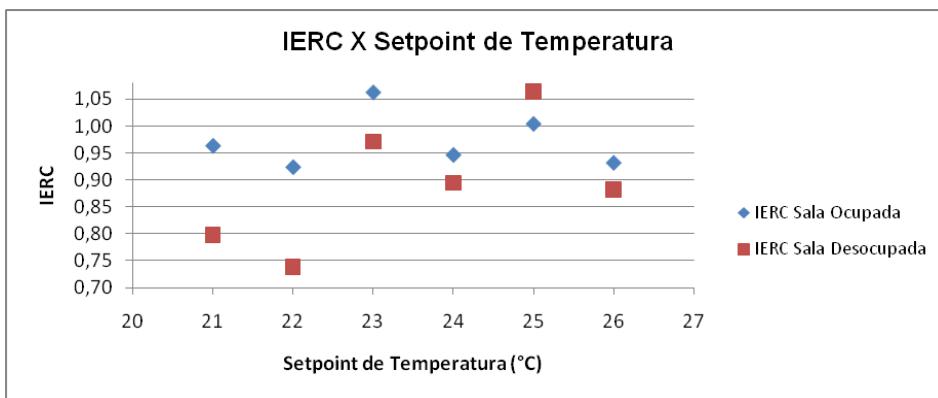


Figura 10 - Índice de Efetividade da Ventilação X *Setpoint* de Temperatura do Ar (°C)

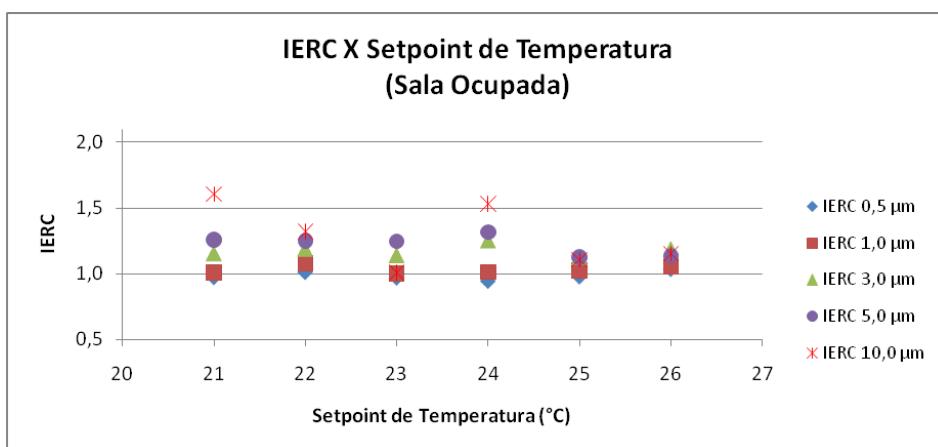


Figura 11 - Índice de Efetividade da Ventilação (remoção de partículas) X *Setpoint* de Temperatura do Ar (°C) por tamanho de partícula (ambiente ocupado)

Os valores médios de teor de CO₂, tanto para 1,10 m como para 2,60 m, foram inferiores a 1000 ppm, atendendo à norma ASHRAE 62.1 (2004). Os resultados de IERCO₂ (Figura 12) foram sempre superiores a 1 e melhores para sala desocupada, em oposição ao observado para partículas em suspensão. Os melhores índices foram observados no *setpoint* de 22°C, sala ocupada e desocupada, o que indica que neste dia provavelmente foram adotadas as melhores condições de operação do sistema.

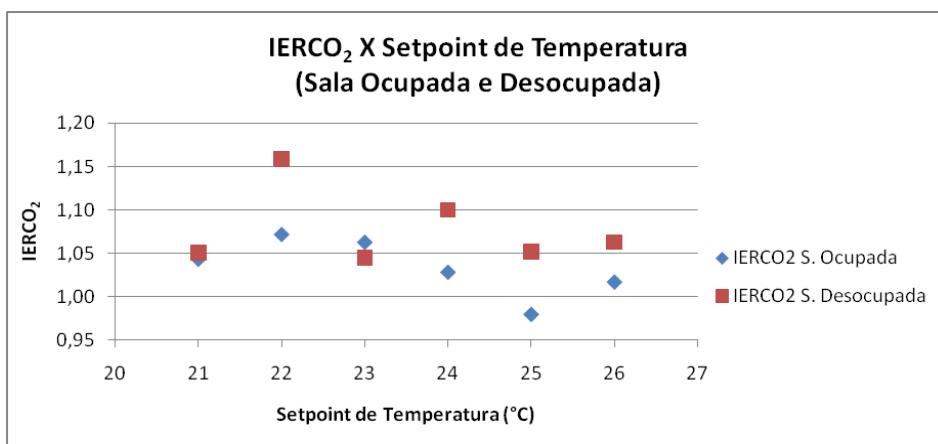


Figura 12 - Índice de Efetividade da Ventilação (remoção de CO₂) X *Setpoint* de Temperatura do Ar (°C) (ambiente ocupado e desocupado)

5 CONCLUSÕES

Devido às baixas velocidades e baixos valores de TPS (menores que 0,035 mg/m³) medidos durante o período de sala ocupada, é razoável inferir que este tipo de sistema de climatização não dispersa contaminantes no ar do ambiente.

Referindo-se à efetividade da ventilação, no que diz respeito à capacidade de remoção de partículas e CO₂ do ambiente, este sistema confirmou a sua eficiência, apresentando índices próximos ou superiores à unidade, típico do sistema com distribuição de ar pelo piso. Para sala ocupada, o melhor IERC (para TPS) foi 1,06 (primeira etapa das medições, 23°C). O melhor IERCO₂ foi 1,07 (segunda etapa das medições, 22°C).

Em relação às condições de operação do sistema, ficou clara a grande influência das condições climáticas no processo de ajuste dos *setpoints*. Portanto, as melhores condições de operação do sistema para cada etapa do estudo devem ser apresentadas com os valores de temperatura e umidade relativa do ar externo correspondentes (Tabela 2 e Tabela 3):

Tabela 2 - Melhores *setpoints* de operação do sistema e condições climáticas correspondentes
(1^a etapa das medições)

Variável / <i>Setpoint</i> de Temperatura (°C)	23
Diferencial de Pressão do Ar ΔP (Pa)	4,00
Temperatura do Ar Frio (°C)	14,0
Temperatura do Ar de Insuflamento (°C)	18,0
Diferencial de Temperatura do Ar ΔT (°C)	6,0
Temperatura do Ar Externo (°C)	27,1
Umidade Relativa do Ar Externo (%)	46

Tabela 3 - Melhores *setpoints* de operação do sistema e condições climáticas correspondentes
(2^a etapa das medições)

Variável / <i>Setpoint</i> de Temperatura (°C)	22
Diferencial de Pressão do Ar ΔP (Pa)	5,00
Temperatura do Ar Frio (°C)	13,0
Temperatura do Ar de Insuflamento (°C)	15,5
Diferencial de Temperatura do Ar ΔT (°C)	8,0
Temperatura do Ar Externo (°C)	28,2
Umidade Relativa do Ar Externo (%)	62

É patente que este tipo de sistema de climatização contribui para a sustentabilidade energética da edificação, promovendo melhor qualidade do ar interior, sob condições de conforto térmico. Portanto, mais pesquisas em relação ao seu projeto e operação são recomendadas, a fim de que se possa disseminar a sua aplicação ao redor do mundo.

6 REFERÊNCIAS

ABE, V. C.; INATOMI, T. A. H; LEITE, B. C. C. Air Quality in UFAD Systems: literature overview. In: *HEALTHY BUILDINGS: CREATING A HEALTHY INDOOR ENVIRONMENT FOR*

PEOPLE, 2006, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: IDMEC/FEUP, 2006. p. 425 - 430 – v. IV.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. **ANSI/ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta - USA: 2004.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. **ANSI/ASHRAE Standard 62.1**: Ventilation for Acceptable Air Quality. Atlanta - USA: 2004.

BAUMAN, F. S. **Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide**. United States of America: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2003. 237 p.

CERMAK, R., MELIKOV, A. K. Air Quality and Thermal Comfort in an Office with Underfloor, Mixing and Displacement Ventilation. **The International Journal of Ventilation**. v. 5, n. 3, p. 323-332, 2006.

DIN Deutsches Institut für Normung. **DIN EN ISO 7730**. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Berlin, 2005.

IKEDA, M. J. **Determinação de Índices de Ajuste no Controle de Sistema de Condicionamento de Ar do Tipo “Teto Frio”**. 2008. 190 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

International Standards Organization. **ISO 7726**: Thermal environments – Instruments and methods for measuring physical quantities. Geneva, 1998.

LEHRER, D. R.; BAUMAN, F. S. Hype Vs. Reality: New Research Findings on Underfloor Air Distribution Systems. **CBE Database**, 2003. Disponível em: <http://www.cbe.berkeley.edu/research/pdf_files/Lehrer2003_UFAD.pdf>. Acesso em 14 mai. 2007.

LEITE, B.C.C. **Sistema de Ar Condicionado com Insuflamento pelo Piso em Ambientes de Escritórios: Avaliação do Conforto Térmico e Condições de Operação**. 2003. 152 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MUNDT, E. Non-buoyant pollutant sources and particles in displacement ventilation. **Building and Environment**, v. 36, n. 7, p. 829-836, Aug. 2001.

MUNDT, E. et al. **Ventilation Effectiveness**. Guidebook n. 2. Bélgica: Rehva, 2004. 74 p.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro a esta pesquisa.