

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO E EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM UMA SALA DE AULA

B. L. da SILVA¹, F. ODISI¹, D. NORILER¹ e E. L. REINEHR¹

¹Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química
Email para contato: blsilva1203@hotmail.com

RESUMO – O poluente de maior concentração em ambientes fechados como salas de aula é o dióxido de carbono (CO₂), que em altas concentrações prejudica o desempenho dos estudantes, causando sintomas como dores de cabeça e sonolência. Este estudo objetiva analisar a distribuição da concentração média de CO₂ dentro de uma sala de aula por meio da simulação numérica, e investigar métodos para mantê-la abaixo do limite estabelecido pela ANVISA, de 1000 ppm. Para as simulações numéricas, utilizaram-se técnicas de CFD tomando-se como base uma sala de aula ocupada por 60 pessoas e com concentração inicial de CO₂ de 380 ppm. Os resultados mostram que com a sala fechada e considerando apenas a infiltração de ar através de frestas, após 371 segundos a concentração média de CO₂ no volume atinge o limite estabelecido. A partir deste ponto, a renovação de ar por convecção natural pela porta e/ou janelas com configurações aplicadas no dia-a-dia foi insuficiente para reduzi-la. Estabelecer uma condição de velocidade prescrita de 0,5 m/s para a entrada de ar nas janelas, com a porta aberta, possibilita uma redução significativa da concentração de CO₂. Foi possível determinar uma condição geométrica específica de abertura da porta e das janelas para a manutenção da concentração média de CO₂ abaixo do limite, apenas por convecção natural.

1. INTRODUÇÃO

O conforto térmico costuma ser a maior preocupação das pessoas quanto às características do ar dentro de ambientes fechados. No entanto, um fator muitas vezes passado despercebido é tão quanto, ou até mais importante: a concentração de contaminantes. Neste tipo de ambiente, o poluente de maior concentração é o dióxido de carbono, proveniente da própria respiração dos ocupantes.

A ocupação densa ou períodos prolongados com pouca renovação de ar promovem um aumento dos níveis de concentração de dióxido de carbono acima dos limites toleráveis para o bom funcionamento do metabolismo. Estudos indicam que, quando inalado em concentrações acima de 1000 ppm, o dióxido de carbono causa desconforto e sintomas como sonolência, dores de cabeça e falta de concentração. Em concentrações próximas a 30.000 ppm pode causar convulsões e até mesmo a morte por asfixia (Odisi, 2013).

Existem diversos órgãos responsáveis pela elaboração de normas que garantem a qualidade do

ar em ambientes interiores destinados a ocupação. No Brasil, o limite de concentração de dióxido de carbono em ambientes confinados é regulamentado pela Resolução nº 09 da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). Sua concentração é usada como indicador de renovação de ar externo, recomendando-se o limite de 1000 ppm para garantir o conforto e bem-estar dos ocupantes (ANVISA, 2003). A taxa de renovação de ar adequada em ambientes climatizados foi estabelecida como 27 m³/h.pessoa, exceto em casos de alta rotatividade de pessoas, onde é recomendada uma taxa mínima de 17 m³/h.pessoa (ANVISA, 2003).

Salas de aula são típicos ambientes densamente ocupados, com extenso tempo de permanência dos estudantes e professores, o que favorece um aumento da concentração de dióxido de carbono. A má qualidade do ar tem influência direta na redução de seu desempenho, especialmente em dias de inverno, quando a ventilação é escassa devido à preferência dada ao conforto térmico. Um estudo da qualidade do ar interior é, portanto, indispensável para garantir a saúde e o bom desempenho dos ocupantes. Propõe-se analisar a distribuição da concentração de dióxido de carbono dentro de uma sala de aula e investigar condições de ventilação que mantivessem sua concentração abaixo do limite estabelecido no Brasil, de 1000 ppm. Utiliza-se a técnica da mecânica dos fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics).

O uso de técnicas numéricas de CFD na solução de problemas é hoje uma realidade graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento (Maliska, 2004). É uma ferramenta simples e versátil, cada vez mais utilizada devido à rapidez e ao baixo custo de obtenção de resultados, quando comparada a métodos experimentais. Possibilita a alteração da geometria e dos parâmetros de projeto sem custos associados a experimentos no laboratório ou no campo (Soares et al, 2013), sendo esta a principal vantagem da sua utilização.

2. METODOLOGIA NUMÉRICA

Tomou-se como base para o estudo uma sala de aula do Campus II da Universidade Regional de Blumenau. A sala de aula possui dimensões de 9,00 m × 7,70 m × 3,18 m. Apresenta dois aparelhos de ar condicionado e duas janelas, cada uma com área máxima de abertura de 1,7 m², incluindo as frestas. A porta possui dimensões de 2,10 m × 1,00 m, e há 15 luminárias distribuídas no teto. Sua geometria foi elaborada no programa DesignModeler, integrante do pacote Workbench 14.0 da ANSYS, considerando 60 estudantes sentados às respectivas carteiras (Figura 1). Foram incluídos os domínios do corredor e de espaços adjacentes do lado de fora das janelas, quando estes foram considerados abertos, para que as condições de contorno não comprometessem a solução.

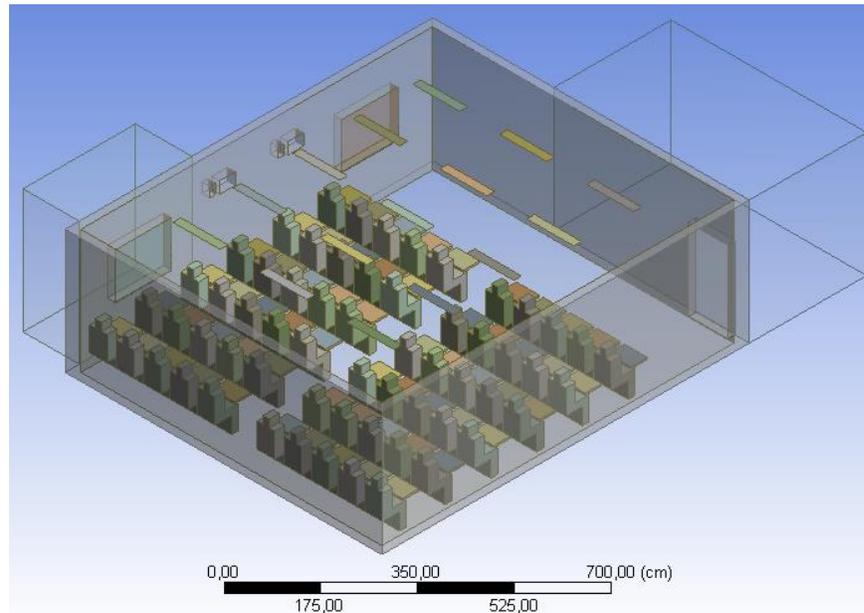


Figura 1 – Geometria da sala de aula.

Sobre a geometria foi construída uma malha numérica com o auxílio da ferramenta Meshing, integrante do pacote Workbench 14.0 da ANSYS. Optou-se pelo método CutCell para reduzir o número de elementos. Este variou entre 340.000 e 390.000 elementos, dependendo da inclusão dos domínios do corredor e dos exteriores das janelas, com predominância hexaédrica. Conforme mostrado na Figura 2, as regiões próximas aos estudantes foram refinadas, assim como as regiões próximas às janelas, porta e teto.

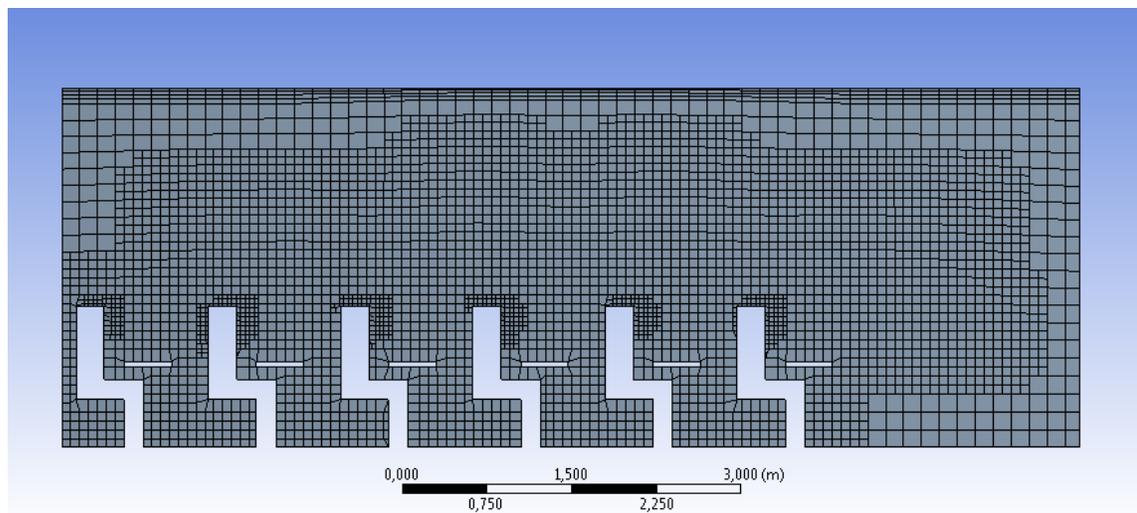


Figura 2 – Corte na malha do domínio.

As simulações foram realizadas com o código comercial FLUENT 14.0 da ANSYS, que utiliza o método de volumes finitos para solução das equações de conservação. Os modelos de transferência

de calor e de transporte de espécies foram incluídos, considerando uma mistura de ar e dióxido de carbono.

As condições iniciais e de contorno do problema foram definidas para um dia de inverno, quando a temperatura exterior na região de Blumenau fica em torno de 288 K (15 °C). A temperatura inicial no interior da sala de aula foi assumida como 293 K, dentro da faixa de 20 °C a 22°C recomendada pela ANVISA (2003) para ambientes internos em dias de inverno. A concentração inicial e exterior de dióxido de carbono foi especificada como 380 ppm (Carvalho, 2008).

As temperaturas do ar expirado, das superfícies dos corpos das pessoas, e das luminárias foram determinadas experimentalmente como 303, 307 e 313 K. Adotou-se a taxa de dióxido de carbono emitida como 20 L/h.pessoa, correspondente a um nível sedentário de atividade (Perino e Heiselberg, 2009). Assumindo a fração volumétrica de dióxido de carbono no ar expirado como 1, a taxa total de dióxido de carbono emitido na sala de aula pelas 60 pessoas equivale a $5,959e^{-4}$ kg/s.

As simulações foram organizadas em estratégias. Na 1ª Estratégia, a sala de aula foi simulada com a porta e as janelas fechadas, com fluxo de ar apenas através de frestas, até que a concentração média de dióxido de carbono no domínio atingisse o limite de 1000 ppm. Partindo deste ponto como condição inicial, abriram-se a porta e/ou as janelas para simular a renovação de ar por convecção natural, configurando-as com condição de contorno de pressão efetiva prescrita zero. Em alguns casos, considerou-se a circulação do ar no interior do domínio através dos aparelhos de ar condicionado, sem resfriamento. Alterou-se a geometria da sala de aula na 3ª e 11ª Estratégias, e avaliou-se também a modificação da condição de contorno nas janelas para velocidade prescrita de 0,5 m/s, na 10ª Estratégia, que se qualifica como vento de intensidade baixa (aragem, na escala de Beaufort). A descrição de todas as estratégias pode ser conferida na Tabela 1.

Tabela 1 – Estratégias de simulação

Estratégia	Descrição
1ª Estratégia	Sala fechada, com infiltração apenas por frestas
2ª Estratégia	Porta aberta
3ª Estratégia	Porta estendida e aberta
4ª Estratégia	Porta e janela dos fundos abertas
5ª Estratégia	Porta e duas janelas abertas
6ª Estratégia	Dois janelas abertas
7ª Estratégia	Porta aberta com circulação do ar
8ª Estratégia	Porta e janela dos fundos abertas com circulação do ar
9ª Estratégia	Porta e duas janelas abertas com circulação do ar
10ª Estratégia	Porta aberta e velocidade prescrita nas janelas, com circulação do ar
11ª Estratégia	Porta aberta, janelas fechadas e espaços acima das janelas abertos

O pós-processamento dos resultados das simulações foi realizado com o auxílio do programa CFD-Post 14.0 da ANSYS.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Constatou-se na 1ª Estratégia que, após 371 segundos, a concentração média de dióxido de carbono no volume atingiu o limite de 1000 ppm, recomendado para a boa qualidade do ar interior. A evolução da concentração média de dióxido de carbono no volume da sala com o tempo, para as demais estratégias, está ilustrada na Figura 3.

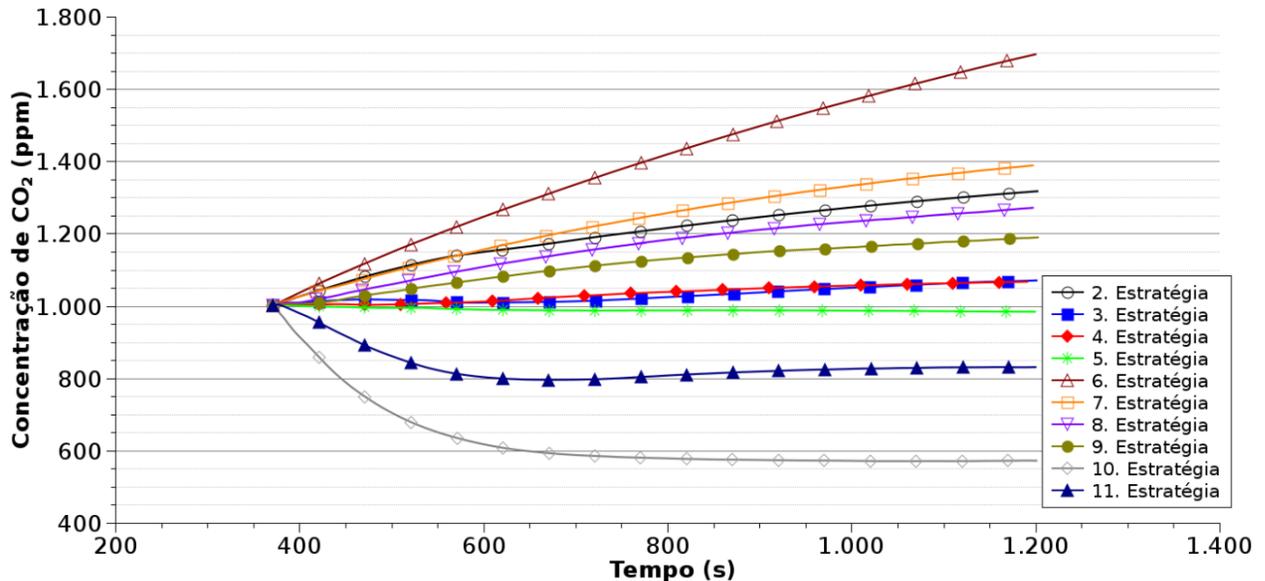


Figura 3 – Concentração média de dióxido de carbono no volume em função do tempo.

Algumas ações comuns no cotidiano da sala de aula para a renovação do ar interior são a abertura da porta combinada ou não com a abertura das janelas (2ª, 4ª, 5ª e 6ª Estratégias). Estas se mostraram em geral pouco efetivas, embora fossem avaliadas em uma pior condição, com dependência da convecção natural e 60 ocupantes. A 5ª Estratégia teve um efeito superior às outras citadas, devido à abertura da porta e de ambas as janelas, mantendo a concentração de dióxido de carbono aproximadamente constante, mas ainda não permitindo a sua redução.

Entre todas as simulações, a 6ª Estratégia apresentou o pior resultado. A geometria da sala de aula em estudo favorece a entrada de ar exterior por baixo, por possuir temperatura inferior à do ar interior, e sua saída por cima. Assim, o ar entra preferencialmente pela região mais baixa da porta e sai pela região mais alta e pelas janelas, como ilustrado na Figura 4. Na 6ª Estratégia, o nível de elevação das janelas prejudicou, portanto, a entrada do ar frio e com baixo teor de dióxido de carbono, como pode ser observado na Figura 5.

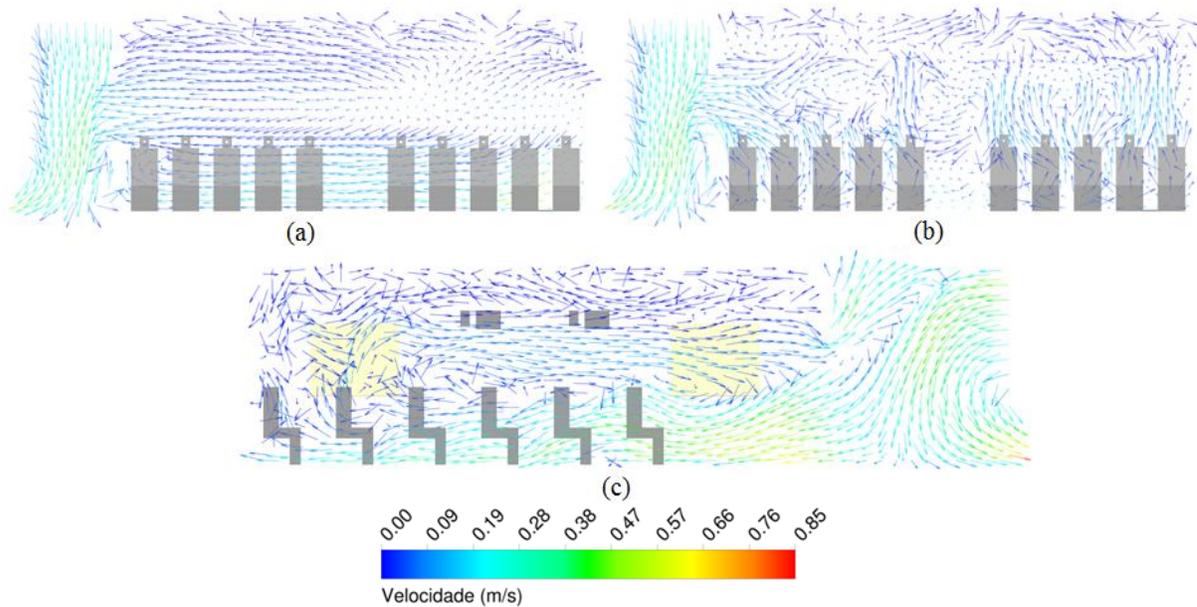


Figura 4 – Vetores da velocidade a 1200 s da 5ª Estratégia em planos perpendiculares (a) à janela da frente; (b) à janela dos fundos; (c) à porta.

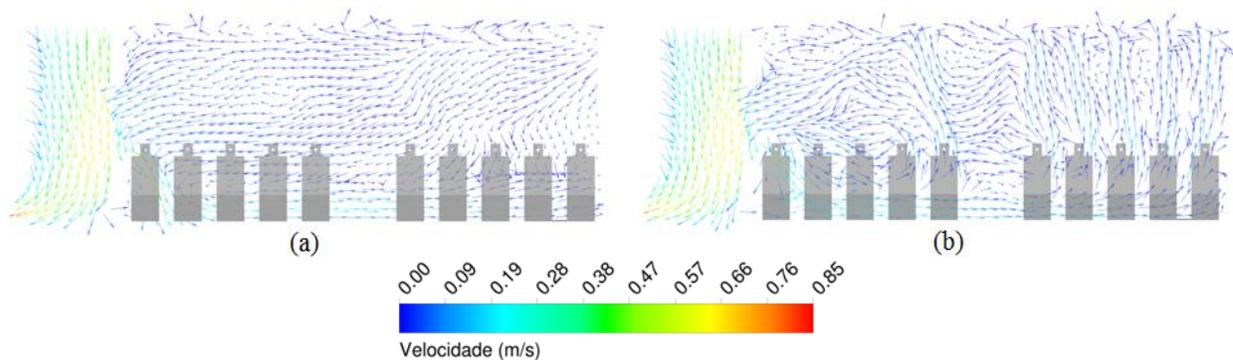


Figura 5 – Vetores da velocidade a 1200 s da 6ª Estratégia em planos perpendiculares (a) à janela da frente; (b) à janela dos fundos.

Além da preferência de escoamento do ar, observou-se a formação de uma região rica em dióxido de carbono acima das janelas da sala de aula. Experimentou-se configurar a circulação do ar através dos aparelhos de ar condicionado na 7ª, 8ª e 9ª Estratégias, fazendo com que fosse insuflado com velocidade de 6 m/s, mas com a mesma temperatura e concentração de dióxido de carbono do ar retirado pelos aparelhos. A circulação do ar promoveu sua homogeneização, mas prejudicou sua renovação quando em comparação com os casos sem circulação. Devido ao posicionamento dos aparelhos na mesma parede que as janelas, o movimento induzido dificultou a saída do ar pelas janelas e, em especial na 7ª Estratégia, sua entrada através da porta. Este comportamento é visível na Figura 6.

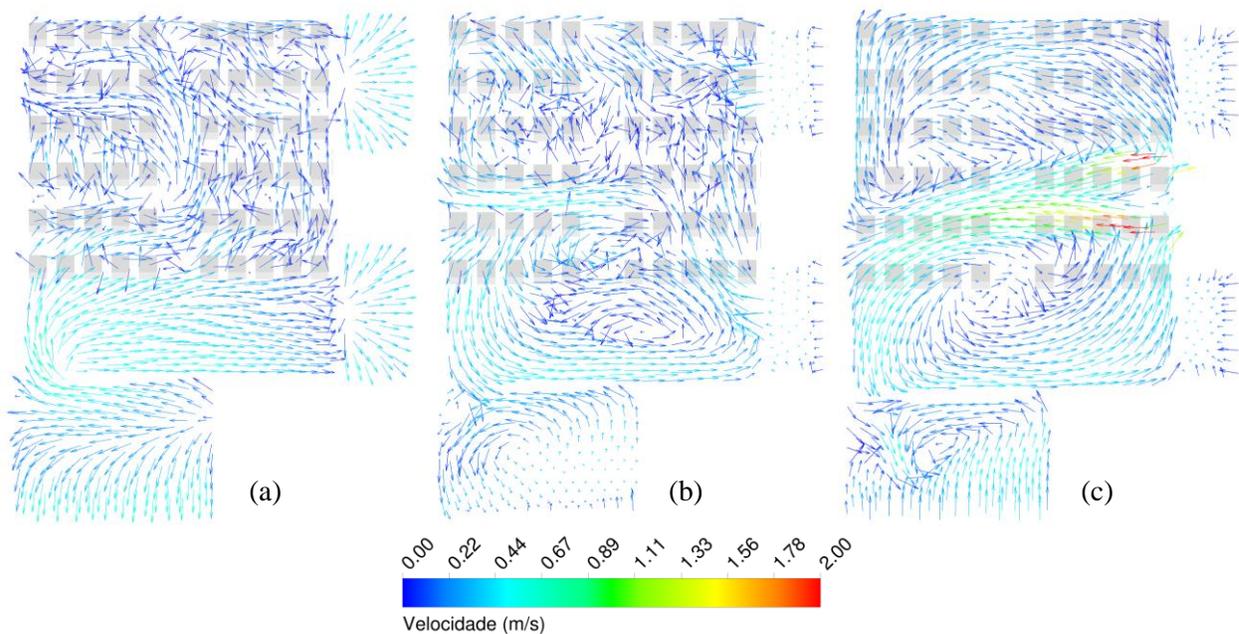


Figura 6 – Vetores da velocidade a 1200 s da 9ª Estratégia em planos (a) a 30 cm do piso; (b) 115 cm do piso; (c) a 228 cm do piso.

A 3ª Estratégia foi também executada com o intuito de facilitar a renovação do ar na região acima das janelas, através da modificação da geometria da sala de aula. Apesar de não possibilitar a redução da concentração média de dióxido de carbono na sala de aula, apresentou valores até 19% inferiores em comparação com a 2ª Estratégia.

Os melhores resultados foram obtidos através da 10ª Estratégia, com insuflamento do ar exterior através das janelas com velocidade de 0,5 m/s. Neste caso, o ar deixou a sala de aula exclusivamente pela porta, com seu escoamento favorecido pela circulação promovida pelos aparelhos de ar condicionado. Em 4 minutos de simulação, a concentração média de dióxido de carbono no volume foi reduzida em 40%, chegando a níveis aceitáveis de qualidade do ar.

O escoamento preferencial desenvolvido pelo ar na sala de aula em estudo e os resultados obtidos através da 3ª Estratégia motivaram o desenvolvimento da 11ª Estratégia, onde a geometria da sala de aula foi alterada de modo que apenas os espaços acima das janelas ficassem abertos. Esta condição possibilitou a entrada do ar exterior através da porta, e a saída do ar rico em dióxido de carbono pelos espaços acima das janelas. Mesmo com o escoamento limitado à convecção natural, promoveu-se a redução e manutenção da concentração de dióxido de carbono abaixo do limite de 1000 ppm.

4. CONCLUSÃO

O estudo numérico da distribuição de dióxido de carbono dentro de uma sala de aula específica foi conduzido para avaliar estratégias de manutenção da qualidade do ar em seu interior que

garantissem o bom desempenho de seus ocupantes. Como foi possível observar na 1ª Estratégia, em pouco mais de 6 minutos com a sala de aula fechada, o limite recomendável de 1000 ppm foi atingido. As estratégias normalmente adotadas no dia-a-dia, como a abertura da porta e/ou das janelas, mostraram-se ineficazes. Ressalta-se que esta avaliação se deu, com exceção da 10ª Estratégia, em piores condições decorrentes da dependência da convecção natural para renovação do ar. A condição de velocidade prescrita nas janelas, na 10ª Estratégia, permitiu uma rápida renovação do ar interior, no entanto, esta condição necessita ser verificada experimentalmente.

Os resultados obtidos demonstram a necessidade de se levar em conta a manutenção da qualidade do ar interior em ambientes densamente ocupados, como salas de aula, no projeto dos edifícios. Para a geometria da sala de aula em estudo, a modificação proposta na 11ª Estratégia permitiu que a redução da concentração média de dióxido de carbono no volume fosse alcançada apenas através da convecção natural. Esta solução, embora se aplique exclusivamente à geometria da sala em estudo, sugere um método de se favorecer a renovação do ar no interior de outros ambientes internos destinados à ocupação.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução RE nº 9: Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo. Brasília, 2003.

CARVALHO, J. C. Dióxido de carbono na atmosfera: Sequestro de carbono. 2008. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/quimica/dioxido-de-carbono-na-atmosfera-sequestro-de-carbono.htm>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

PERINO, M.; HEISELBERG, P. Short-term airing by natural ventilation – modeling and control strategies. *Indoor Air*, v. 19, p. 357-380, 2009.

ODISI, F. Avaliação da evolução e estratégias para controle da concentração do dióxido de carbono em uma sala de aula. Blumenau: FURB, 2013. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2013.

SOARES, C.; NORILER, D.; WOLF MACIEL, M. R.; BARROS, A. A. C.; MEIER, H. F. Verification and validation in CFD for a free-surface gas-liquid flow in channels. *Braz. J. Chem. Eng.*, v. 30, n. 2, 2013.