

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA QUALIDADE DE AR EM SALAS DE AULA

Fernando Dal Pogeto - fernando.pogeto@usp.br

Antonio Luis de Campos Mariani – camposmariani@gmail.com

Sérgio Luís Guilhotti – sergioluis.guilhotti@gmail.com

Marcos de Mattos Pimenta - mmpimenta@uol.com.br

Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, www.poli.usp.br

F2 – Qualidade Ambiental Interna

Resumo. *Conhecer a qualidade do ar interior (QAI) em edificações ocupadas por pessoas é tema de grande relevância. Especialmente em ambientes urbanos em que há presença de poluentes que podem causar incômodo, manifestação de irritações e doenças principalmente relacionadas ao sistema respiratório das pessoas. Os sistemas de ar condicionado devem oferecer condições para o ar ambiente que melhore o conforto e garanta a saúde dos ocupantes. Podem, também, colaborar com o aumento da produtividade em locais em que ocorrem atividades de trabalho e de ensino. Para avaliar a QAI de um ambiente interno há parâmetros que devem ser considerados e grandezas medidas. No estudo que está sendo realizado para avaliar a QAI em salas de aula, foram medidas temperatura de bulbo seco, umidade relativa, concentração de particulados de diferentes tamanhos como PM₁₀, PM_{2,5}, e concentração de gases CO e CO₂. Há dois parâmetros que influenciam a QAI e que estão sendo modificados e monitorados: os processos de filtragem e a vazão de ar exterior que é introduzida para renovação do ar. Considerando estes dois parâmetros importantes, foi definido um ambiente interno de uma Instituição de Ensino de Nível Superior como local de investigação, trata-se de uma sala de aula do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Nesta sala estão instalados dois equipamentos de ar condicionado e quatro unidades de renovação de ar que possui dupla filtragem do ar externo (G4 + M5). Estas unidades podem ser acionadas individualmente promovendo a alteração na vazão de ar externo. A sala de aula recebeu diferentes tipos de atividades, como aulas tradicionais e atividades de fabricação de protótipos (chamadas Oficinas). Nesse último tipo de atividade há períodos de produção de material particulado durante processos de fabricação. Medições experimentais avaliaram os parâmetros do ar interior e do ar exterior no período da realização das medidas considerando efeitos produzidos por diferentes taxas de vazão de ar externo, que está sendo tratado pelos dois estágios de filtração. Resultados são apresentados nesse trabalho, e analisados de modo comparativo. A discussão é realizada principalmente avaliando os efeitos de diferentes valores de vazões de ar externo filtrado em função do tipo de atividade existente no ambiente interno, e suas consequências sobre a concentração dos elementos em suspensão no ar. Os resultados podem auxiliar a discussão atual que está sendo realizada na revisão da norma NBR 16401 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários.*

Palavras-chave: Ar condicionado, qualidade do ar interior, sala de aula.

1. INTRODUÇÃO

A Qualidade do Ar Interno (QAI), também identificada pela abreviação IAQ (*Indoor Air Quality*) tem sido tratada no Brasil, e em nível internacional, envolvendo intensas investigações e debate. Ela depende de diferentes fatores como a presença de materiais poluentes, que podem ser particulados ou gases, e que estão tanto no meio interior como no meio exterior. No meio urbano esta investigação é cada vez mais importante, pois a diversidade dos poluentes está sendo ampliada pela presença de particulados mais finos, usualmente relacionados a novos materiais, novas substâncias e processos cada vez mais sofisticados. Estes materiais quando estão presentes em concentração com valores acima de limites estabelecidos podem ser prejudiciais a saúde de ocupantes dos ambientes.

Por outro lado, os equipamentos de ar condicionado e os processos de filtragem tem evoluído e há disponibilidade de tecnologia moderna para realizar o tratamento do ar com pleno êxito de modo que os ambientes internos estejam plenamente satisfatórios em termos de QAI. O que é preciso estabelecer com melhor exatidão é a relação entre o que é necessário em termos de equipamentos, e em termos de parâmetros de operação para os sistemas de condicionamento de ar para atender cada tipo de ambiente interno, de modo que a sofisticação apresentada pelo projeto, a definição dos equipamentos, dos parâmetros de filtração e da vazão de ar externo não estejam reduzidos, nem excessivos. Acertar a escolha dos equipamentos de ar condicionado, filtros adequados para a finalidade da ocupação dos ambientes atendidos, e fazê-lo operar de modo a consumir uma quantidade racional de energia é a meta a aplicação de resultados da análise dos estudos que estão sendo realizados.

O presente estudo apresenta um conjunto de experimentos realizados em ambiente de sala de aula, em situações distintas, e que pode contribuir para entender como os parâmetros relacionados a QAI podem ser combinados resultando na melhor aplicação de processos de filtragem e nas vazões de ar externo para renovação do ar interior.

O conceito de Qualidade do Ar Interno foi estabelecido a partir de estudos e avaliações experimentais realizados em edificações nas quais haviam sistemas de tratamento de ar. Instituições internacionais que atuam na área do ar condicionado e na área da saúde apresentam definições para a qualidade do ar, como relacionadas a seguir:

- SMACNA (1998) diz que: “Qualidade do ar interno pode ser definida como a natureza do ar que afeta a saúde e a percepção dos ocupantes” o que incorpora o conceito de saúde da Organização Mundial da Saúde OMS ou WHO.
- WHO – World Health Organization, afirma que: “Saúde é um estado de bem estar completo e abrangente, físico, mental e social e não apenas um estado em que há ausência de doenças e enfermidades”.
- ASHRAE (2011 e 2016) propõe que “Ar de qualidade aceitável é aquele que não possui contaminantes em concentrações acima de limites, prejudiciais a saúde (conforme estabelecido pelas autoridades competentes), e é considerado como satisfatório pela maioria dos ocupantes (80% ou mais)”.

A ASHRAE em seu *Handbook of Fundamentals* (2017), capítulo 16, aborda o assunto citando o longo e extenso debate que ocorreu desde os anos 1930 relacionados aos requisitos do ar externo e a outros fatores que contribuíram para o desenvolvimento do conceito de QAI citando os estudos de Grimsrud e Teichman de 1989, o artigo de revisão histórica de Janssen de 1989, de Klaus et al. de 1970, de Yaglou e Witheridge de 1937, e de Yaglou et al. de 1936. Diz que, a partir das fontes de referência históricas, as maiores considerações incluem a vazão de ar externo requerida para controlar a umidade transportada pelo ar, dióxido de carbono, odores e fumaça de tabaco gerado pelos ocupantes. Estas considerações levaram às prescrições de vazões mínimas de ar externo por ocupante (por pessoa) ou por unidade de área do ambiente, ou por ambos. A ASHRAE reforça também que, recentemente, uma grande preocupação tem sido a manutenção da concentração interna aceitável de vários poluentes adicionais, que não são gerados primariamente pelos ocupantes.

2. OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho é apresentar um estudo experimental em que a medição de parâmetros relacionados ao ar interior de um ambiente de sala de aula, ao ar exterior, combinada variação da vazão de ar externo, possibilite analisar o comportamento da QAI nesse local. Deseja-se estabelecer comparações entre diferentes efeitos provocados pela alteração da vazão de ar externo durante aulas em que são realizadas atividades didáticas práticas e aulas teóricas. Nessa sala de aula são analisados os valores de concentração de materiais que podem causar poluição nos ambientes, especialmente os particulados de tamanho até 10 μm (PM_{10}), de tamanho até 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) e a concentração de dióxido de carbono (CO_2). Quer-se avaliar os valores resultantes das concentrações destes poluentes em função do tempo e do tipo de atividade, assim como verificar seu comportamento após o efeito da variação da vazão de ar externo. São determinados intervalos de tempo em que as taxas de variação de concentração de poluentes são influenciadas pela alteração da vazão de ar externo, buscando comparar os resultados com patamares estabelecidos em referências brasileiras e internacionais.

3. METODOLOGIA

3.1 Definição do ambiente e equipamentos

Foram definidos o ambiente e a instrumentação utilizada em edições do evento “Oficina de Brinquedos” visando manter similaridade de condições e possibilitar a comparação de resultados. Dessa forma, o ambiente estudado foi a sala de aula A2 do prédio de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI), dimensões aproximadas de (16,1 x 12,1) m, com altura média de 3,0 m.

Durante o evento, foram realizadas de atividades práticas de diferentes características, algumas que movimentam o ar e agitam o particulado em suspensão e outras que geram particulado. Além disso, há a contribuição do fluxo de particulado oriundo do fluxo de ar externo, não captado pelos filtros existentes.

Conforme Fakhoury (2017), que realizou medições na edição do evento de 2016, os equipamentos do sistema de climatização e de ventilação do ambiente estudado estão apresentados na tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Equipamentos de ventilação e de condicionamento de ar utilizados

| CAIXAS DE VENTILAÇÃO | | UNIDADES DE CONDICIONAMENTO DE AR | | |
|--|----------|-----------------------------------|-------------|----------------|
| Fabricante | MULTIVAC | Unidade | Evaporadora | Condensadora |
| Modelo | CFM 1000 | Fabricante | CARRIER | CARRIER |
| Vazão máxima nominal (m³/h) (c/filtro G4) | 1000 | Modelo | 42XQM48C5 | 38CQEP048535MC |
| Pressão máxima (Pa) | 620 | Capacidade (kW) | 14 | 14 |
| Filtros usados (classe) | G4 + M5 | Vazão de ar (m³/h) | 1785 | 6420 |

3.2 Definição da instrumentação

As grandezas avaliadas e a instrumentação utilizada durante as medições é descrita a seguir:

- Temperatura e umidade relativa:
Termo-higrômetro: faixa de temperatura de 0°C a 50°C, com exatidão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, resolução de 0,1°C, faixa de umidade relativa de 0% a 100%, com exatidão de $\pm 2\%$, resolução de 0,1%.
- Concentração de CO₂:
Sensor portátil com o funcionamento através de um sensor infravermelho: faixa nominal de medição de 0 a 5000 ppm, com exatidão de $\pm(75 \text{ ppm} + 3\% \text{ do valor medido})$, resolução de 1 ppm.
- Concentração de partículas em suspensão no ar de dimensões caracterizadas por PM₁₀ e PM_{2,5}:
Contador de partículas portátil, com funcionamento a dispersão ótica: com faixa nominal de medição de 0 a 4×10^6 partículas/ft³, com exatidão de $\pm 5\%$, resolução de 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

3.3 Procedimento Experimental

As medições das concentrações de CO₂, PM_{2,5} e PM₁₀ foram realizadas no interior da sala e no exterior da edificação, na região da tomada de ar exterior, em função do tempo, em intervalos não exatamente constantes, mas em valores próximos, e foram considerados os momentos das mudanças de atividade pelos ocupantes. Foram também medidas as grandezas relacionadas aos fatores físicos da QAI, como Temperatura de Bulbo Seco (TBS) e Umidade Relativa (UR), que não são apresentados como resultados neste trabalho por questão de disponibilidade de espaço e pelo objetivo aqui proposto está focado nos materiais em suspensão no ar. Foram registrados o número de ocupantes e o tipo de atividade que ocorreu em cada intervalo de tempo. O posicionamento dos instrumentos seguiu referências adotadas em medições similares, localizando-os na região central do ambiente na altura de 1,5 m do piso.

4. MEDIÇÕES E RESULTADOS

Foram realizadas medições, tanto em atividades práticas, tais como as oficinas de brinquedos, quanto em aulas teóricas. Serão apresentados a seguir os gráficos das concentrações dos poluentes que se mostraram mais sensíveis à variação da vazão de ar externo.

4.1 Atividades práticas

O evento “Oficina de Brinquedos” realizado na sala A2 do prédio da Engenharia Mecânica da POLI-USP, teve três edições, todas com monitoração da QAI. A terceira versão ocorreu no dia 9 de junho de 2018, está apresentada nesse trabalho, sendo analisada conjuntamente com versões anteriores. A dinâmica do evento proporcionou diferentes comportamentos dos ocupantes e tipos de atividades, as quais estão registradas conforme tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Tipo de atividade em função do horário

| Nº do Período | Horário: Início-Fim | Atividade dos Ocupantes |
|---------------|---------------------|---|
| 1 | 10:25 - 10:45 | Ocupantes sentados |
| 2 | 11:00 - 11:35 | Movimentação média e 40% dos ocupantes lixando |
| 3 | 11:45 - 11:56 | Ocupantes sentados realizando a fabricação |
| 4 | 12:00 - 12:25 | 90% dos ocupantes realizando lixamento de madeira |
| 5 | 12:29 - 13:45 | Pausa para almoço |
| 6 | 14:00 - 16:54 | Furação e montagem do brinquedo |
| 7 | 17:00 - 17:30 | Finalização da montagem |
| 8 | 17:34 - 17:53 | Alunos Sentados após a montagem |
| 9 | 18:00 - 18:15 | Limpeza da Sala |

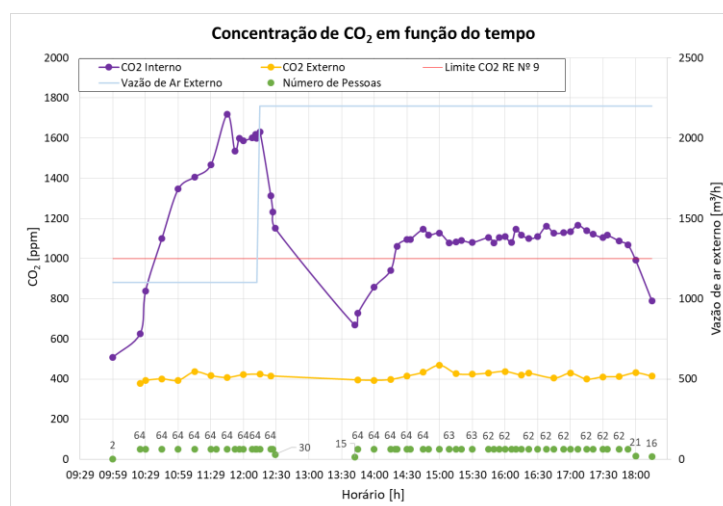


Figura 1: Concentração de CO₂. Oficina de Brinquedos de 9/6/2018.

Na figura 1 estão apresentados os resultados das medições da concentração de CO₂ no ambiente interno e no ambiente exterior. No período 1 a 4, a concentração de CO₂ foi crescente, quando a renovação era de 17 m³/(h*peessoa), sucedido pelo período 5, quando houve uma grande redução, devido à desocupação da sala e aumento da taxa de renovação de ar externo para 35 m³/(h*peessoa). Após a retomada das atividades, houve estabilidade na concentração em torno de 1100 ppm.

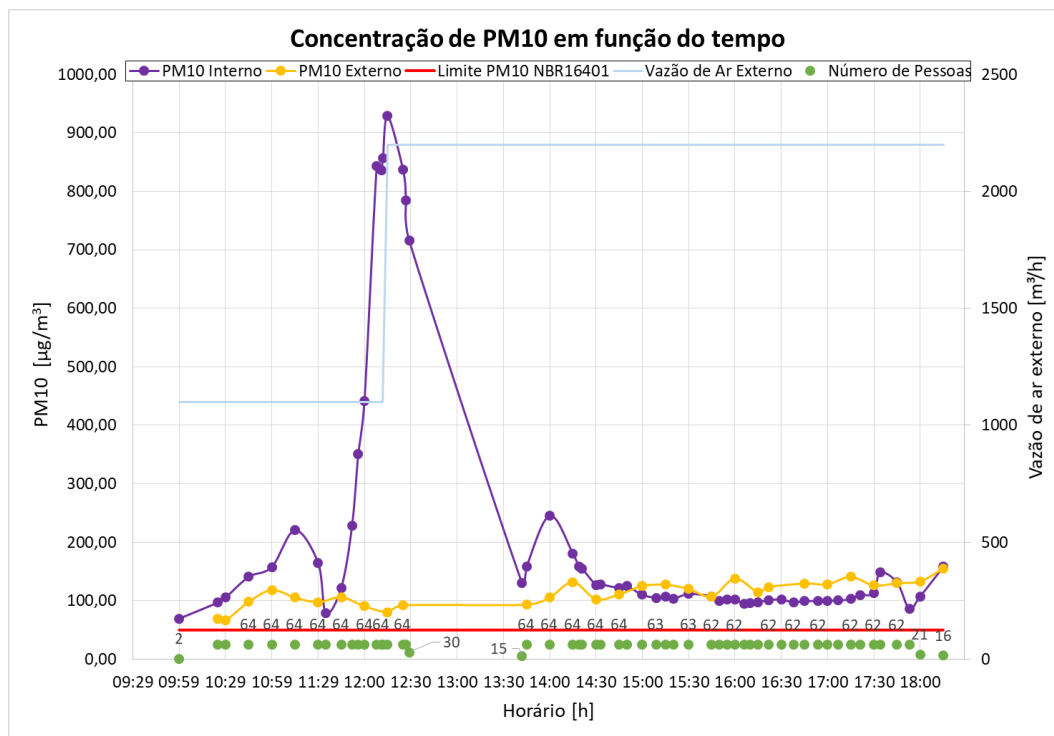


Figura 2: Concentração de PM₁₀ na Oficina de Brinquedos de 9/6/2018.

Na figura 2 estão os valores medidos para a concentração de PM₁₀, sendo que nos períodos 3 e 4, condição em que houve produção intensa de particulado, observa-se um enorme aumento de concentração de PM₁₀, sendo que no período subsequente (período 5), há uma rápida redução deste parâmetro, provocado por dois fatores: desocupação do ambiente (sem produção de pó e sem agitação do ar) e aumento da vazão de ar externo.

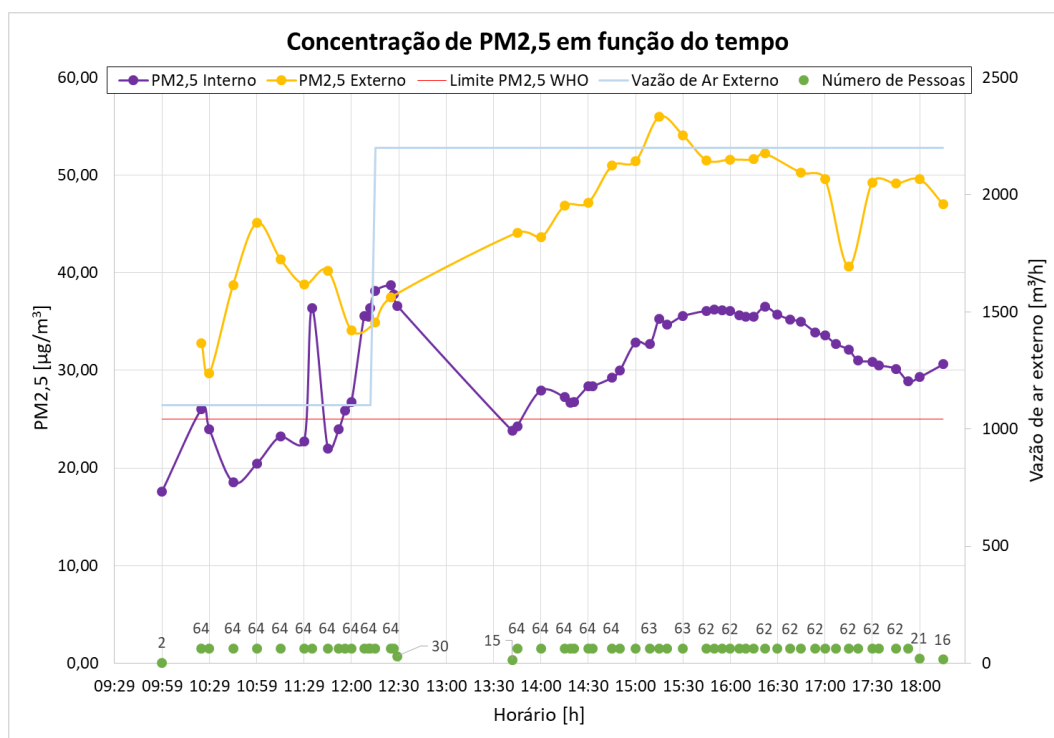


Figura 3: Concentração de PM_{2,5} na Oficina de Brinquedos de 9/6/2018.

No gráfico da Figura 3, há uma grande instabilidade da concentração externa do PM_{2,5}, cujo valor normalmente tem pouca variação no tempo. Isto aconteceu devido à realização de limpeza dos jardins das proximidades deste prédio com varredor pneumático, o que provocou o aumento deste tipo de particulado, mantendo os valores dessa concentração acima do limite estabelecido pela OMS. Dessa forma, não há razão para comparar estes valores com os valores medidos pelas estações de medição de qualidade do ar da CETESB, as quais não tiveram esta influência.

Durante o período das medições, o ambiente interno foi mantido com o sistema de climatização operando. A temperatura interna no início da operação do sistema de climatização era de 20,6°C, atingindo o valor de 24,5°C, enquanto que a temperatura externa oscilou entre 18,8 °C e 21,6°C. Neste período, a umidade relativa interna variou de 58,7% a 74,8%, e a umidade relativa externa, de 62,5% a 75,9%.

4.2 Aulas teóricas

As medições apresentadas a seguir foram feitas no dia 20 de outubro de 2017 durante uma aula na mesma sala A2 do prédio da Engenharia Mecânica da POLI-USP.

Para validar os dados coletados durante neste dia foram comparados os resultados medidos para o ar externo com os valores da estação de medição de qualidade do ar da CETESB mais próxima, a estação Pinheiros. Ressalta-se que a concentração de particulado PM₁₀ e de CO₂ medidos nesse estudo não estavam disponíveis na base de dados do QUALAR-CETESB e, portanto, a comparação é feita apenas com os parâmetros em comum.

Tabela 3. Comparação dados coletados na Escola Politécnica com dados da estação próxima da CETESB (20/10/2017)

| | PM _{2,5} | | TBS | |
|-------|-------------------|----------------|------|----------------|
| | POLI | Est. Pinheiros | POLI | Est. Pinheiros |
| 09:00 | 9,5 | 6 | 22,2 | 21,6 |
| 10:00 | 9,5 | 5 | 21,7 | 23 |

Estão apresentados a seguir os gráficos da concentração de CO₂, de PM₁₀ e de PM_{2,5} que posteriormente são utilizados para comparação com os dados coletados por Fakhoury (2017). Neste experimento há dois valores estabelecidos para a vazão de ar exterior: na primeira hora a vazão é mantida nula, e na segunda hora a vazão atinge o valor máximo. Isto resulta em taxas de renovação de ar oscilando entre 53 m³/(h* pessoa) e 67 m³/(h* pessoa).

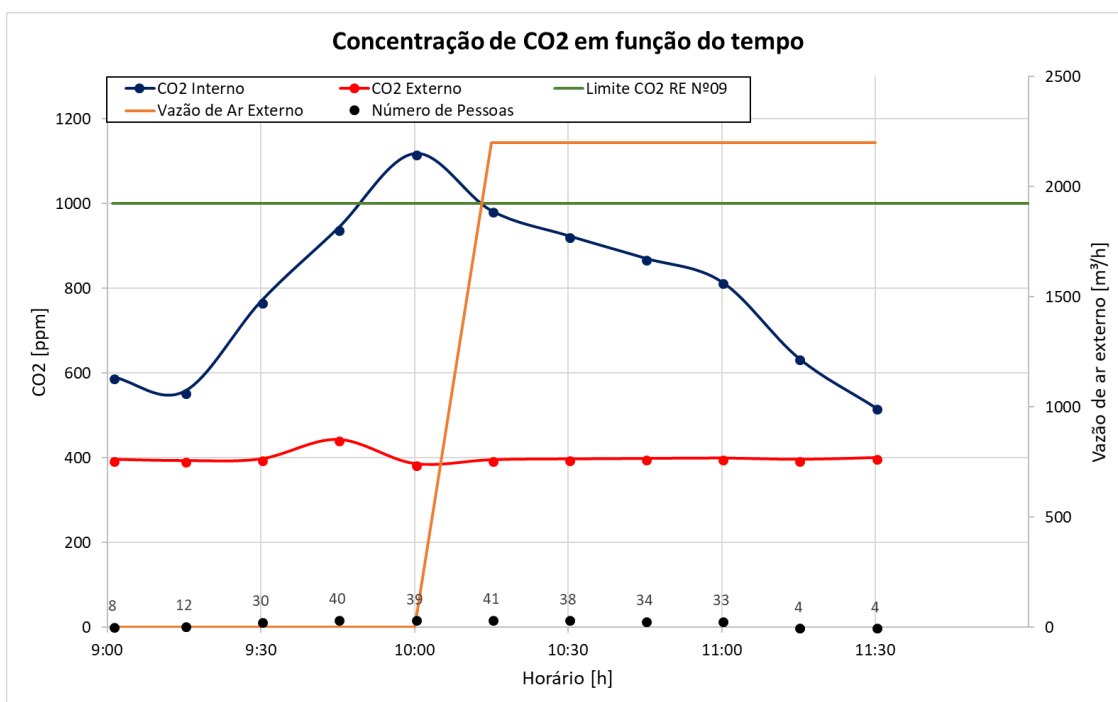


Figura 4. Concentração de CO₂ na aula teórica de 20/10/2017.

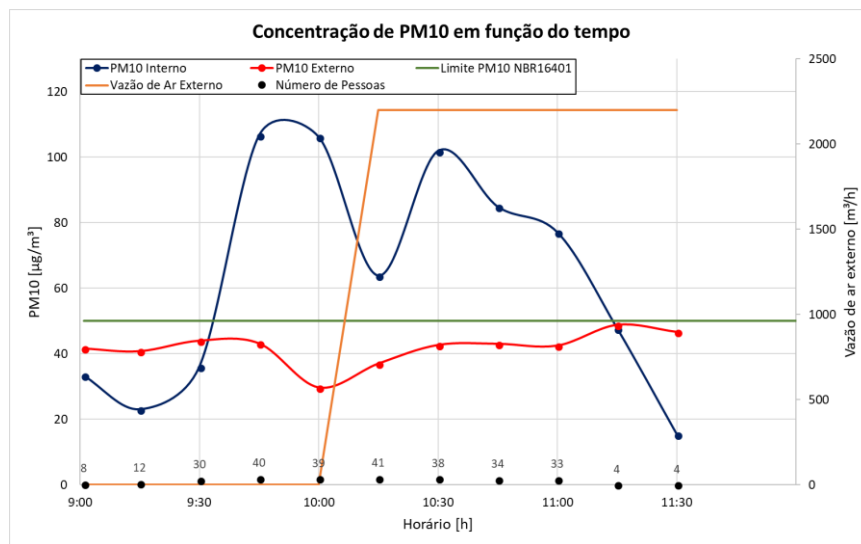


Figura 5. Concentração de PM₁₀ na aula teórica de 20/10/2017.

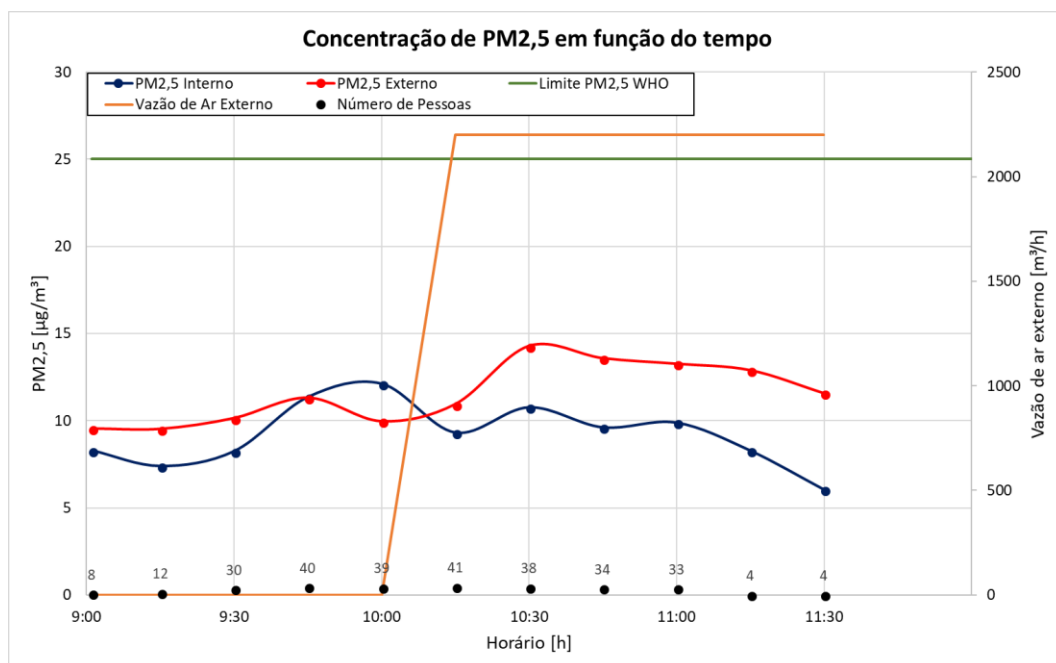


Figura 6. Concentração de PM_{2,5} na aula teórica de 20/10/2017.

Neste ensaio, as medições começaram às 9:00 horas com a sala já ocupada por alguns alunos e o sistema de ar condicionado estava desligado, sendo acionado logo após a primeira tomada de dados, porém sem renovação de ar. A vazão de ar externo é ligada ao máximo, assim que a concentração de CO₂ ultrapassou o limite de 1000 ppm, atingindo o valor de 1100 ppm. No gráfico da Figura 4, verifica-se que são necessários menos de 15 minutos para que o ambiente retorne para valores abaixo de 1000 ppm, operando com a vazão máxima. Em relação ao particulado, PM_{2,5} e PM₁₀, ocorrem quedas significativas com o acionamento das unidades de ar exterior, mas as taxas de decaimento são claramente diferentes para CO₂, PM₁₀, e PM_{2,5}, ou seja, para um mesmo aumento de vazão de ar externo há diferentes resultados em função do tipo de material poluente:

Outros eventos são registrados e suas consequências na concentração de particulados em suspensão são:

- Entrada de estudantes na sala de aula: no período das 9:10 às 9:45 horas houve grande movimentação, e resulta em aumento significativo de PM₁₀, mas o PM_{2,5} praticamente não sofre alteração no mesmo intervalo de tempo.
- Uso do quadro negro com giz: aproximadamente das 10:15 às 10:30 horas há escrita com riscos de giz, e o resultado é aumento significativo de PM₁₀, com o PM_{2,5} praticamente constante no mesmo intervalo de tempo.
- Saída das pessoas a partir das 11:00 horas: queda nos valores de PM₁₀, e de PM_{2,5}, sendo que a saída, realizada mais lentamente, não provoca aumento da concentração de PM₁₀, e os valores da concentração dos particulados diminuem, porém em proporções diferentes, sendo que PM₁₀ reduziu 77% e o PM_{2,5} diminuiu 40% para o mesmo intervalo de tempo.

Durante toda a medição a umidade relativa e a temperatura de bulbo seco mantiveram-se estáveis e dentro dos limites estipulados pela norma brasileira NBR 16401 – Parte 3.

5. ANÁLISES

5.1 Atividades Práticas

As medições da concentração de particulado PM₁₀, realizadas em 09/06/18, foram comparadas com as respectivas medições realizadas nas duas edições anteriores do mesmo evento, tendo como meta a obtenção de referência e valores para uma comparação consistente, conforme Tabela 4:

Tabela 4: Tipo de atividade em função do horário

| Evento/Data | Período de Análise (Intervalos de Tempo-minutos) | Atividade Ocupantes | Núm. de Ocupantes | Vazão Nominal Ar Ext. (m ³ /h) | Vazão Ar Ext. por ocupante (m ³ /h*p) | Concentração PM10 (µg/m ³) | | Variação da conc. no tempo PM10 (µg/(m ³ *h)) |
|----------------------------------|--|---------------------|-------------------|---|--|--|-------|--|
| | | | | | | Inicial | Final | |
| Oficina de Brinquedos 21/05/2016 | 13h50-14h15 (25 min.) | Lixamento | 44 | 1100 | 25 | 61 | 710 | 1.559 |
| | 14h15-15h (45 min.) | Lixamento | 45 | 1658 | 38 | 710 | 98 | -816 |
| Oficina de Brinquedos 10/06/2017 | 14h20-14h50 (30 min.) | Lixamento | 70 | 1100 | 16 | 112 | 1094 | 1.963 |
| | 15h-15h30 (30 min.) | Pouco Lixamento | 70 | 2200 | 31 | 733 | 180 | -1.105 |
| Oficina de Brinquedos 09/06/2018 | 11h45-12h10 (25 min.) | Lixamento | 64 | 1100 | 17 | 122 | 836 | 1.712 |
| | 12h15-12h29 (14 min.) | Lixamento | 64 | 2200 | 35 | 929 | 716 | -912,8 |

Considerando o fato de que as medições de concentração de PM10 foram realizadas em intervalos de tempo diferentes, definiu-se como parâmetro para comparações o parâmetro: variação da concentração no tempo. Os valores desse parâmetro, quando positivos, indicam crescimento na concentração, apresentam comportamento similar comparando as três edições do evento. Isto revela, principalmente, que a capacidade interna de geração deste tipo de particulado foi equivalente. Concomitantemente, houve efeito de decantação do particulado e diluição da concentração, devido ao sistema de renovação de ar externo.

Quando a variação da concentração no tempo é negativa, observou-se valores bastante próximos entre si, comparando as três edições do evento. Isto indica o comportamento do efeito de diluição da concentração de particulado, quando submetido às taxas de renovação maiores que no período anterior, combinado com a produção de particulado simultâneo, realizado nestes períodos.

A análise da concentração de CO₂ medida no evento de 09/06/2018, está indicada com valores médios na tabela 5. Adotando como referência o valor da diferença I-E de 700 ppm, obtido no anexo C da NBR-16401:2008, Parte 3, para uma atividade sedentária, e taxa de renovação de 27 m³/(h*pessoa), que é a mesma da Portaria MS3523, no período entre 14 e 18 horas, os valores (I-E) da norma e medidos estão muito próximos. Porém na medição a vazão de ar externo entretando a unidade de ar externo operou com vazão de ar externo é de 35 m³/(h*pessoa), portanto, 29,6% maior.

Tabela 5: Concentração de CO₂ do ambiente interior para duas vazões de ar externo

| Parâmetro | Período de Análise | Vazão Ar Externo por ocupante (m ³ /h) | Condição Externa (E) (ppm) | Condição Interna (I) (ppm) | Diferença I – E (ppm) |
|-----------------|--------------------|---|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| CO ₂ | 10h-14h | 17 | 407±17 | 1596±51 | 1189 |
| | 14h-18h | 35 | 421±18 | 1109±27 | 688 |

Tabela 6: Concentração de particulado PM₁₀ do ambiente interior para duas vazões de ar externo

| Parâmetro | Período de Análise | Vazão Ar Externo por ocupante (m ³ /h) | Condição Externa (E) (µg/m ³) | Condição Interna (I) (µg/m ³) | Diferença I – E (µg/m ³) |
|------------------|--------------------|---|---|---|--------------------------------------|
| PM ₁₀ | 12h08-12h27 | 17 | 94±9 | 843±66 | 749,0 |
| | 15h-17h30 | 35 | 126±10 | 103±5 | -22,5 |

Na tabela 6, verifica-se que os valores medidos para PM₁₀, no período de 15:00 às 17:30 horas para os ambientes externos e internos se mantiveram estáveis, estando a vazão de ar de renovação adequada. Entretanto, a concentração se

está acima do limite estabelecido pelo anexo B da Norma NBR-16401:2008, que indica $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como referência. Neste caso recomenda-se uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI's).

No que tange à concentração de $\text{PM}_{2,5}$ medida no evento de 09/06/2018, temos dois períodos bem definidos, conforme tabela 7. Nesta tabela observa-se que as concentrações internas medidas estão próximas ao limite da concentração máxima estabelecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mesmo com uma geração de particulado externa bem acima do normal, devido ao varredor pneumático, o que

Tabela 7: Concentração de particulado $\text{PM}_{2,5}$ do ambiente interior para duas vazões de ar externo

| Parâmetro | Período de Análise | Vazão Ar Externo por ocupante (m^3/h) | Condição Externa (E) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Condição Interna (I) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Diferença I – E ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------------------|--------------------|---|---|---|--|
| $\text{PM}_{2,5}$ | 10h-12h | 17 | 38 ± 5 | 24 ± 5 | -14 |
| | 15h30-16h30 | 35 | $39,5 \pm 1,5$ | $29,8 \pm 0,3$ | -9,7 |

5.2 Aulas teóricas

As análises são baseadas em dados coletados no presente estudo comparados com as medições feitas por Fakhoury (2017), apresentadas nas Fig. 4, 5 e 6.

Ao analisar as condições das medições realizadas em ambos os estudos, verifica-se que elas são similares, que os tempos de medição são parecidos e são adotadas as mesmas variações de vazão de ar externo. O que muda é a quantidade de ocupantes na sala. Por exemplo no caso da aula de 20/10/2017 havia menos alunos presentes, e a ocupação menor deixa evidente a influência que a renovação do ar tem na diluição de poluentes.

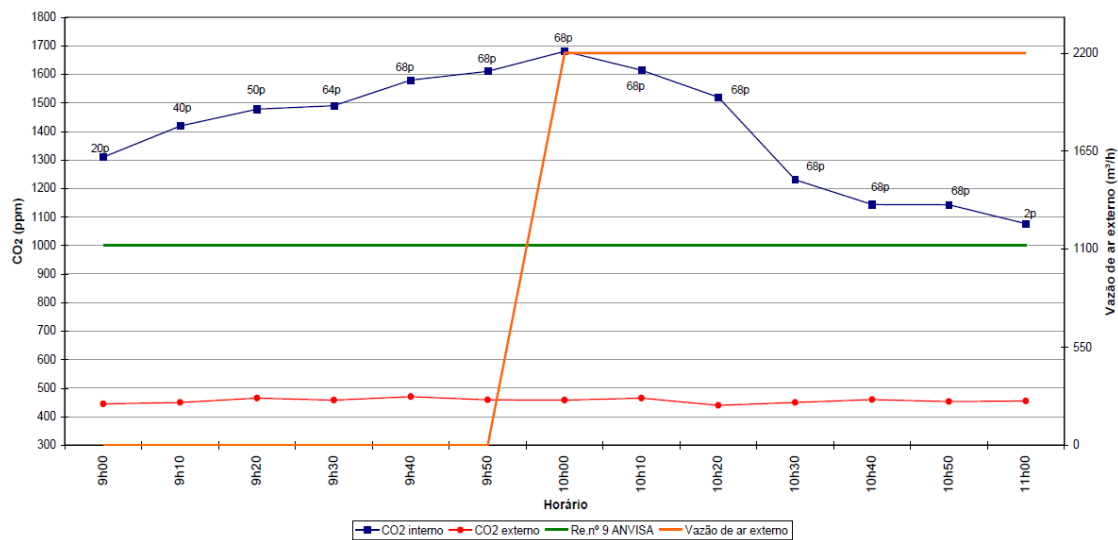


Figura 8: Concentração de CO_2 na aula do dia 22/08/2016. Fonte: Fakhoury (2017).

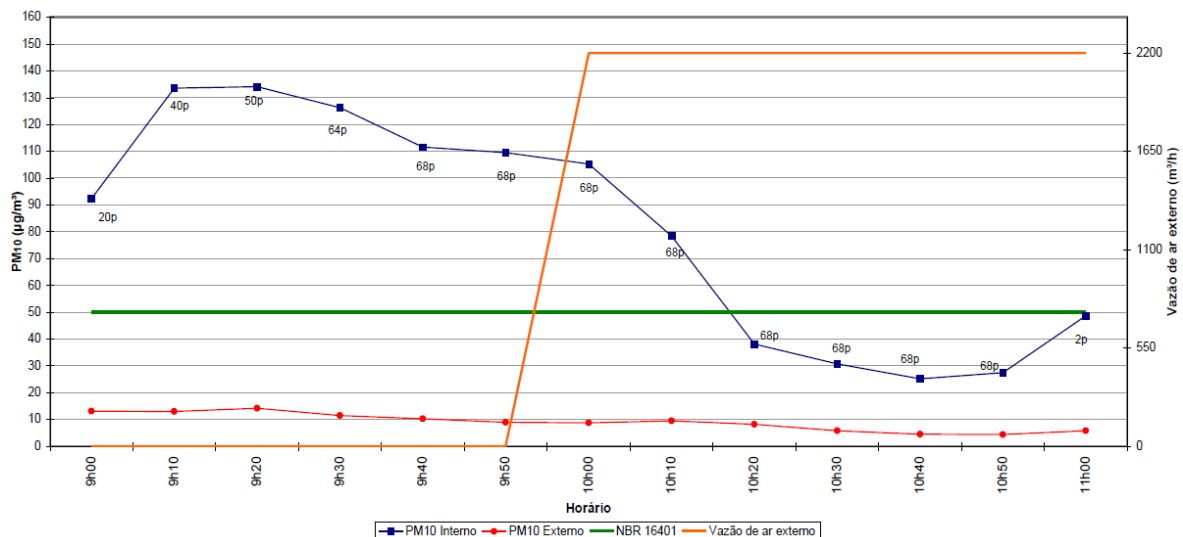


Figura 9. Concentração de PM_{10} na aula do dia 22/08/2016. Fonte: Fakhoury (2017).

Ao comparar as Fig.6 e 10 verifica-se que o incremento na vazão de ar externo tem um impacto positivo na concentração de dióxido de carbono no ambiente interno. As porcentagens de decaimento são apresentadas na Tab. 8.

A concentração de particulado, PM₁₀, tem a particularidade de que durante a aula do dia 20 de outubro logo após o acionamento da vazão de ar externo, inicia-se o uso da lousa, gerando mais particulado, mesmo assim, após trinta minutos do uso da lousa há uma redução substancial da quantidade de particulado em suspensão no ar ambiente. Porém ela não é tão grande quanto no caso da aula do dia 22 de agosto, onde não há uma nova fonte geradora de PM₁₀.

Por fim tem-se a comparação do PM_{2,5} que após trinta minutos de vazão externa máxima não há grandes mudanças, mas que ao se analisar um período maior, pode-se ver que este contaminante também decresce. Mas atribui-se que a taxa de decaimento deste particulado é menor ao fato de que suas concentrações já são baixas e que a geração dele, tanto pelo uso da lousa, quanto pela movimentação de pessoas, não é significativa.

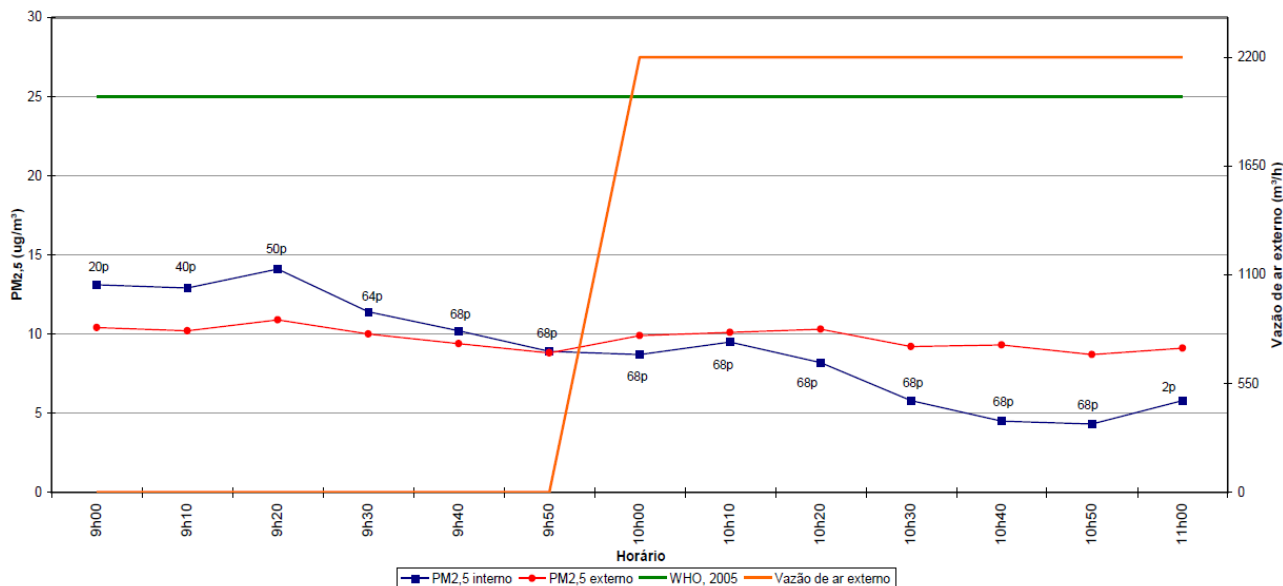


Figura 10. Concentração de PM_{2,5} na aula do dia 22/08/2016. Fonte: Fakhoury (2017).

Tabela 8. Comparação da taxa de decaimento dos contaminantes.

| | Aula dia 22/08/2016 | Aula dia 20/10/2017 |
|--|---------------------|---------------------|
| Vazão por pessoa [m³/(h.pessoa)] | 32 | 54 |
| Redução do CO ₂ após 30 minutos [%] | 11% | 18% |
| Redução do PM ₁₀ após 30 minutos [%] | 27% | 20% |
| Redução do PM _{2,5} após 30 minutos [%] | 0% | 9% |

6. CONCLUSÕES

As diferenças entre as concentrações internas e externas de CO₂ medidas nas aulas teóricas (atividades sedentárias) e em laboratórios (mais agitadas) para vazão de ar de renovação entre 31 a 35 m³/(h*pessoa) se mantiveram entre 688 ppm e 785 ppm, valores próximos da concentração de 700 ppm indicada no Anexo C (informativo) da Norma NBR 16.401:2008, que está associada a vazão de ar de renovação de 27 m³/(h*pessoa).

As medições da concentração de particulado internas de PM_{2,5} permitem concluir que o filtro com classe de filtração M5 é bastante adequado para o fluxo de renovação de ar, pois permitiu manter uma concentração aceitável, mesmo com uma geração de particulado externa muito maior (4 a 5 vezes) do que em condições normais.

As medições da concentração de particulado externas de PM_{2,5} e PM₁₀ nos eventos de 22/08/16 e 22/10/17 estão muito próximos entre si, mas muito menores que o evento de 09/06/18, que teve como diferencial a ocorrência de varrição pneumática nas imediações, o que denota a grande geração adicional de particulados, prejudicando bastante a qualidade do ar externo.

Nos casos em que a vazão de ar externo é aumentada para diluir os poluentes monitorados no ambiente interno, os valores da velocidade de redução da concentração, caracterizada como variação da concentração no tempo apresenta comportamento diferente para cada um dos poluentes estudado (CO₂, PM₁₀ e PM_{2,5}). Isto é, para definir o valor da vazão de ar externo para um determinado ambiente, em que são realizadas atividades específicas, deve ser adotado o valor da vazão associada ao poluente em que a variação da concentração no tempo é mais lenta, ou seja, a taxa de diluição é menor.

Assim, os resultados deste estudo alinham-se com os apresentados por Yaglou e Witheridge, por Yaglou et al., entre outros (apud ASHRAE 2017), em que concluíram que os poluentes tinham comportamentos diferentes, não há um padrão de diluição comum. Portanto os valores de vazões de ar externo que devem ser definidos para a garantia da QAI devem ter atenção especial para aqueles que são mais críticos para a saúde humana. Atualmente estudos apontam para os particulados finos como críticos, por exemplo PM_{2,5}, com a preocupação maior que outros como o CO₂ e o PM₁₀.

Agradecimentos

À empresa CONFORLAB Engenharia Ambiental pelo apoio às atividades experimentais realizadas neste projeto.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16401: Instalações de ar-condicionado. Sistemas centrais e unitários. Brasil, 2008.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16101: Filtros para partículas em suspensão no ar. Determinação da eficiência para filtros grossos, médios e finos. Brasil, 2012.
- ANVISA – Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução: RE no. 9. Brasília. 2003
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Handbook of Fundamentals – SI Edition”, Atlanta, 2017.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Standard 62.1. Ventilation for acceptable indoor air quality, Inc.: Atlanta, 2011 e 2016.
- DAL POGETO, F. Estudo de qualidade do ar em instituições de ensino. Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.
- EPA (Environmental Protection Agency). Energy Savings Plus Health: Indoor Air Quality Guidelines for School Building Upgrades. Indoor Air Quality. United States, October, 2014.
- EPA (Environmental Protection Agency). Particulate Matter (PM) Pollution: What is PM, and how does it get into the air? 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> Acesso em Junho de 2016.
- FAKHOURY, N. A. Estudo da qualidade do ar interior em ambientes educacionais. Dissertação de Mestrado apresentadas na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2017.
- MARIANI, A. L. C. Qualidade do ar interno: mitos e verdades. VII Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar - CONBRAVA. São Paulo. 2003.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL. PORTARIA Nº 3.523 de 28 de agosto de 1998. Ministério da Saúde. Brasília. 1998.
- OLESEN, B. W. Indoor Environment - Health, Comfort and Productivity. Clima. Lausanne, 8th REHVA World Congress, Switzerland, Oct. 9-12, 2005.
- OLESEN, B. W. Indoor Environment Parameters for the Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. AiCARR Journal, Milano, 2018.
- SMACNA, Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association. Indoor Air Quality: A system approach. Chantilly, Virginia, SMACNA, 1998.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air quality guidelines: Global update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF INDOOR AIR QUALITY IN CLASSROOMS

Abstract.

The knowledge about indoor air quality (IAQ) is a concept of great relevance, especially in urban environments, where there are pollutants that can cause discomfort, manifestations of irritation and diseases related to the respiratory system of people. HVAC systems should give better environment conditions for thermal comfort and the health of the occupants. They can also help to increase productivity like offices and classrooms.

To measure the IAQ of a room there are parameters that must be considered and measured. The purpose of this study is to measure the IAQ in classrooms through measures of dry bulb temperature, relative humidity, concentration of particulate matter of dimensions of PM_{10} and $PM_{2,5}$, and concentration of CO and CO_2 gases. There are two parameters that influence the IAQ, which are being modified and monitored: the filtering processes and the outdoor airflow rate. It was defined as studying room, a classroom of the Mechanical Engineering Department of the Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, that has two evaporators and four outdoor fans with two filtration stages (classes G4 + M5). These units can be actuated individually, then there will be change in the outdoor air flow rate. There were different types of activity in the classroom, such as traditional classes and prototyping activities, called workshops, that makes a lot production of particulate matter during fabrication process. Experimental measurements evaluated the parameters of indoor and outdoor air during the normal occupation of classroom with different rates of outdoor airflow, which is being filtered by two stages. The results are presented in this work and analyzed in a comparative way. The discussion is carried out mainly by evaluating the effects of different values of filtered outdoor airflow, according to the type of activity in the classroom, and its consequences on the concentration of suspended particulate matter in the air. The results can help the current discussion that is being carried out in the revision of the Brazilian Standard NBR 16401 - Air-conditioning Installations - Central and Unitary Systems.

Keywords: Air-conditioning, Indoor air quality, classrooms